

Nanotieteen keihäänkärjet Suomessa

Opetusministeriön työryhmämuistioita ja selvityksiä 2005:39

Opetusministeriön työryhmämuistioita ja selvityksiä

Undervisningsministeriets arbetsgruppspromemorior och utredningar

Nanotieteen keihäänkärjet Suomessa

Opetusministeriön työryhmämuistioita ja selvityksiä 2005:39



OPETUSMINISTERIÖ

Undervisningsministeriet

MINISTRY OF EDUCATION

Ministère de l'Éducation

Opetusministeriö / Undervisningsministeriet

Koulutus- ja tiedepolitiikan osasto / Utbildnings- och forskningspolitiska avdelningen

PL / PB 29

00023 Valtioneuvosto / Statsrådet

<http://www.minedu.fi/julkaisut/index.html>

Yliopistopaino / Universitetstryckeriet, 2005

ISBN 952-485-048-6 (nid./htf)

ISBN 952-485-049-4 (PDF)

ISSN 1458-8102

Opetusministeriön työryhmämuistioita ja selvityksiä/

Undervisningsministeriets arbetsgruppspromemorior och utredningar 2005:39

Kuvailulehti

Julkaisija
Opetusministeriö

Julkaisun päivämäärä
2.12.2005

Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri)		Julkaisun laji Opetusministeriön työryhmämuistioita ja selvityksiä	
Nanotieteen kehittämistyöryhmä		Toimeksiantaja Opetusministeriö	
Puheenjohtaja: Markku Mattila Sihteeri: Matti Pylvänäinen		Toimielimen asettamispv 27.04.2005	Dnro 34/040/2005
Julkaisun nimi (myös ruotsinkielinen) Nanotieteen keihäänkärjet Suomessa (Nanovetenskapliga spjutspetsar i Finland)			
Julkaisun osat Muistio + liite			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opetusministeriö asetti 27.4.2005 työryhmän tarkastelemaan nanotieteen tutkimusta ja opetusta yliopistoissa sekä laatimaan ehdotuksen nanotieteen kehittämisohjelmasta yliopistoissa 2007–2009. Työryhmä on tarkastellut nanotieteen kehittämistä keskeisissä teollistuneissa maissa sekä nanoteknologian yhteiskunnallisia vaikutuksia. Työryhmä on selvittänyt nanotieteen tutkimusta ja koulutusta yliopistoissa ja ammattikorkeakouluissa sekä tunnistanut tutkimuksen keihäänkärkiä yliopistoissa. Työryhmä on tarkastellut myös nanoteknologian yritystoimintaa ja teknologiansiirtoa Suomessa.</p> <p>Työryhmä ehdottaa, että opetusministeriö toteuttaa yliopistoissa 2007–2009 nanotieteen ja -teknologian kehittämisohjelman, johon kohdennetaan rahoitusta yhteensä 24 miljoonaa euroa. Kehittämisohjelman tulee tukea nanotieteen tutkimusedellytysten kehittämistä ja huolehtia siitä, että alan koulutustarjonta vastaa työelämän tarpeita.</p> <p>Työryhmä pitää tärkeänä, että nanotieteeseen liittyvää koulutusta kehitetään kansallisesti koordinoitusti välttämällä päällekkäisyyksiä ja hyödyntäen olemassa olevaa opetusta. Yliopistojen on sovittava keskinäisestä yhteistyöstä ja työnjaosta sekä määriteltävä omat vahvuusalueensa. Yliopistojen ja tutkimuslaitosten yhteistyötä tulee vahvistaa.</p> <p>Kehittämisohjelmassa yliopistojen tutkimusedellytyksiä tulee vahvistaa erityisesti ns. keihäänkärkialoilla. Työryhmä katsoo, että tällaisia Suomessa ovat nanomateriaalit, nanoelektroniikka ja -fotoniikka sekä nanobioteknologia. Samoin tulee vahvistaa olemassa olevia vahvoja tutkimus- ja osaamiskeskittymiä. Työryhmä katsoo, että erityisesti nanotieteen kalliiden tutkimusinfrastruktuurien hankinnassa, ylläpitämisessä sekä tukipalveluissa tulee hyödyntää yhteistyön tarjoamia mahdollisuuksia.</p> <p>Korkeatasoinen nanotieteen koulutus ja tutkimus edellyttävät tiivistä kansallista ja kansainvälistä yhteistyötä, jonka merkitys korostuu keihäänkärkialoilla. Korkeatasoisen tutkimuksen rinnalla kehittämisohjelman tulee vahvistaa osaamisen siirtoa, yritysyhteistyötä ja tutkimustulosten liiketoiminnallista hyödyntämistä. Panostuksilla tulee tukea mm. Tekesin FinNano-teknologiaohjelman ja Suomen Akatemian FinNano-tutkimusohjelman tavoitteita. Ammattikorkeakouluja kannustetaan järjestämään nanotieteeseen liittyvää täsmäkoulutusta.</p> <p>Työryhmä esittää, että opetusministeriö nimeää nanotieteen kansallisen yhteistyön vahvistamiseksi alan yhteistyöfoorumin kehittämään toimijoiden välistä työnjakoa ja seuraamaan ohjelman toteutumista. Yhteistyöfoorumin tehtävänä on ohjelman arvioinnin suunnittelu ja ohjelman seurannassa tarvittavien indikaattorien kehittäminen.</p> <p>Työryhmä pitää tärkeänä, että Tieteen tietotekniikan keskuksen CSC:n toimintaedellytykset turvataan ja supertietokone uusitaan suunnitellussa aikataulussa. Tavoitteena on, että Suomella on merkittävä asema laskennallisen tieteen eurooppalaisissa infrastruktuureissa.</p>			
Avainsanat Nanotiede, nanoteknologia, keihäänkärki, osaamiskeskittymä			
Muut tiedot			
Sarjan nimi ja numero Opetusministeriön työryhmämuistioita ja selvityksiä 2005:39		ISSN 1458-8102	ISBN 952-485-048-6 (nid.) 952-485-049-4 (PDF)
Kokonaissivumäärä 84	Kieli suomi	Hinta	Luottamuksellisuus julkinen
Jakaja Yliopistopaino		Kustantaja Opetusministeriö	

Presentationsblad

Utgivare
Undervisningsministeriet

Utgivningsdatum
2.12.2005

Författare (uppgifter om organets namn, ordförande, sekreterare) Arbetsgruppen för utveckling av nanovetenskapen Ordförande: Markku Mattila Sekreterare: Matti Pylvänäinen		Typ av publication Undervisningsministeriets arbetsgruppspromemorior och utredningar	
		Uppdragsgivare Undervisningsministeriet	
		Datum för tillsättande av organet 27.04.2005	Dnr 34/040/2005
Publikation (även den finska titeln) Nanovetenskapliga spjutspetsar i Finland (Nanotieteen keihäänkärjet Suomessa)			
Publikationens delar Promemoria + bilaga			
Sammandrag <p>Undervisningsministeriet tillsatte den 27 april 2005 en arbetsgrupp som skulle granska den nanovetenskapliga forskningen och undervisningen vid universiteten samt utarbeta ett förslag till program för utveckling av nanovetenskapen vid universiteten 2007–2009. Arbetsgruppen har granskat den nanovetenskapliga utvecklingen i de viktigaste industrialiserade länderna samt nanoteknologins samhälleliga verkningar. Arbetsgruppen har utrett den nanovetenskapliga forskningen och utbildningen vid universiteten och i yrkeshögskolorna samt identifierat forskningens spjutspetsar vid universiteten. Arbetsgruppen har även granskat företagsverksamheten och teknologiöverföringen inom nanoteknologi i Finland.</p> <p>Arbetsgruppen föreslår att undervisningsministeriet genomför ett nanovetenskapligt och nanoteknologiskt utvecklingsprogram vid universiteten 2007–2009, vilket tilldelas finansiering på sammanlagt 24 miljoner euro. Utvecklingsprogrammet bör stödja utvecklingen av forskningsvillkoren för nanovetenskap och se till att utbildningsutbudet inom området svarar mot arbetslivets behov.</p> <p>Arbetsgruppen ser det som viktigt att utbildningen kring nanovetenskap utvecklas på ett nationellt samordnat sätt så att man undviker överlappningar och utnyttjar befintlig undervisning. Universiteten bör komma överens om sitt inbördes samarbete och sin inbördes arbetsfördelning samt definiera sina egna styrkeområden. Samarbetet mellan universiteten och forskningsinstituten bör stärkas.</p> <p>Utvecklingsprogrammet bör stärka universitetens forskningsvillkor, särskilt på de s.k. spjutspetsområdena. Sådana är enligt arbetsgruppens mening nanomaterial, nanoelektronik och nanofotonik samt nanobioteknologi. Likaså bör programmet stärka befintliga starka forsknings- och kompetenskoncentrationer. Arbetsgruppen anser det viktigt att man utnyttjar de möjligheter som ett samarbete erbjuder, i synnerhet vid inköp av och ansvar för dyra infrastrukturer för den nanovetenskapliga forskningen samt i stödtjänsterna.</p> <p>Nanovetenskaplig utbildning och forskning på hög nivå förutsätter ett intensivt nationellt och internationellt samarbete. Betydelsen accentueras inom spjutspetsområdena. Parallellt med högklassig forskning bör utvecklingsprogrammet stärka kompetensöverföring, samarbete med företag och affärsmässig exploatering av forskningsresultat. Satsningarna bör stödja målen bl.a. för Teknologiska utvecklingscentralen Tekes teknologiprogram FinNano och Finlands Akademis forskningsprogram FinNano. Yrkeshögskolorna uppmuntras att ordna skräddarsydd utbildning kring nanovetenskap.</p> <p>Arbetsgruppen föreslår att undervisningsministeriet i syfte att stärka det nationella nanovetenskapliga samarbetet utser ett samarbetsforum för branschen, som skall utveckla arbetsfördelningen mellan aktörerna och följa upp genomförandet av programmet. Samarbetsforumets uppgift är att planera en programutvärdering och utveckla indikatorer för uppföljningen av programmet.</p> <p>Arbetsgruppen ser det som viktigt att verksamhetsbetingelserna för Finska IT-centret för vetenskap CSC tryggas och centralens superdator förnyas inom den planerade tidtabellen. Målet är att Finland intar en betydelsefull position i den europeiska infrastrukturen inom beräkningsvetenskap.</p>			
Nyckelord nanovetenskap, nanoteknologi, spjutspets, kompetenskoncentration			
Övriga uppgifter			
Seriens namn och nummer Undervisningsministeriets arbetsgruppspromemorior och utredningar 2005:39		ISSN 1458-8102	ISBN 952-485-048-6 (htf) 952-485-049-4 (PDF)
Sidoantal 84	Språk finska	Pris	Sekretessgrad offentlig
Distribution Universitetstrycket		Förlag Undervisningsministeriet	

Description

Publisher
Ministry of Education

Date of publication
2.12.2005

Authors (If a committee: name of organ, chair, secretary) Committee on the development of nanoscience Chair: Markku Mattila Sekretary: Matti Pylvänäinen	Type of publication Reports of the Ministry of Education, Finland	
	Contracted by Ministry of Education	
	Committee appointed on 27.04.2005	Dno 34/040/2005

Name of publication
Nanoscience spearheads in Finland

Parts Memorandum + appendix

Abstract

On 27 April 2005, the Ministry of Education appointed a committee to look into university research and education in the nanosciences and to give its recommendations for a development programme. The committee studied the development of nanosciences in major industrialised countries and the social impact of nanosciences. Further, it reviewed nanosciences research in universities and polytechnics and identified spearheads. It also looked into nanotechnology business and technology transfer in Finland.

The committee proposes that the Ministry of Education initiate a programme for developing nanosciences and nanotechnology in universities from 2007 to 2009 and reserve a total of 24 million euros for the purpose. The development programme must promote the prerequisites of nanoresearch and ensure that the education supply corresponds to labour market needs.

The committee considers it important that education relating to nanosciences is developed in a coordinated manner to preclude overlapping and with due consideration of existing education. Universities must agree on cooperation and a division of labour and identify their own strong areas. Cooperation between universities and research institutes needs to be stepped up.

The development programme should especially strengthen research prerequisites in the spearhead domains in Finland, which are nanomaterials, nanoelectronics and -photonics and nanobiotechnology. Similarly, the existing strong research and knowledge clusters must be strengthened. In the committee's opinion, the benefits to be gained from pooling resources in the acquisition, maintenance and technical support of the expensive nanoscience infrastructure should be used to the full.

High-standard education and research in nanosciences entail close national and international cooperation, which is of special benefit in the spearheads. Alongside research, the development programme should enhance knowledge transfer, cooperation with business and the commercialisation of research findings. The input must promote the goals of the FinNano technology programme (National Technology Agency of Finland) and FinNano science programme (Academy of Finland). Polytechnics will be encouraged to arrange focused education in nanosciences.

The committee proposes that the Ministry of Education set up a national nanoscience cooperation forum to develop the division of work between the parties involved, to monitor the implementation and plan the evaluation of the programme and to develop the indicators needed in the monitoring.

The committee considers it important to secure the prerequisites of the Finnish IT center for science CSC and to replace the supercomputer in the projected timetable. The aim is to make Finland an important player in the European infrastructure of computational sciences.

Other information

Name and number of series Reports of the Ministry of Education, Finland 2005:39		ISSN 1458-8102	ISBN 952-485-048-6 (pbk) 952-485-049-4 (PDF)
Number of pages 84	Language Finnish	Price	Degree of confidentiality public
Distributed by Helsinki University Press		Published by Ministry of Education	

Opetusministeriölle

Opetusministeriö asetti 27.4.2005 nanotieteen osaamisen kehittämiseksi työryhmän, jonka tehtäväksi annettiin: Edistää nanotieteen ja -teknologian tutkimusta ja opetusta yliopistoissa sekä laatia ehdotus nanotieteen ja -teknologian kehittämisohjelmasta yliopistoissa vuosina 2007–2009. Tehtäväksiannon mukaan työryhmän tuli ottaa kehittämisohjelmassa huomioon valtioneuvoston julkisen tutkimusjärjestelmän kehittämistä koskevan periaatepäätöksen linjaukset sekä tarkoituksenmukaisella tavalla ammattikorkeakoulujen rooli nanotieteessä ja -teknologiassa. Erityisesti työryhmän tuli tarkastella:

- yliopistojen painoaloja ja keskinäistä työnjakoa
- eri toimijoiden yhteistyön ja verkostoitumisen vahvistamista
- perusopetuksen ja tutkijankoulutuksen edistämistä
- nanotieteen ja -teknologian tutkimusinfrastruktuurin (ml. tieteellinen laskenta) kehittämistä ja yhteiskäyttöä
- kansainvälisen yhteistyön edistämistä mukaan lukien EU:n tarjoamien rahoitusmahdollisuuksien hyödyntäminen
- tutkimustulosten hyödyntämistä ja teknologian siirtoa
- nanotieteen yhteiskunnallisten vaikutusten huomioimista


Työryhmän puheenjohtajaksi opetusministeriö kutsui johtaja Markku Mattilan opetusministeriöstä ja jäseniksi akatemiaprofessori Olli Ikkalan Teknillisestä korkeakoulusta, professori Marja-Liisa Riekkolan Helsingin yliopistosta, professori Markus Pessan Tampereen teknillisestä yliopistosta, professori Päivi Törmän Jyväskylän yliopistosta, tutkija Tarja Nevasen VTT Biotekniikasta, opetusneuvos Ari Saarisen opetusministeriöstä, ylitarkastaja Petteri Kauppinen opetusministeriöstä, opetusneuvos Anja Arstila-Paasilinnan opetusministeriöstä ja sihteeriksi hallintopäällikkö Matti Pylvänäisen Jyväskylän yliopistosta. Työryhmän varapuheenjohtajana toimi opetusneuvos Ari Saarinen. Työryhmän pysyviksi asiantuntijoiksi opetusministeriö kutsui ohjelmapäällikkö Petri Ahosen Suomen Akatemiasta, teknologia-asiantuntija Markku Lämsän Tekesistä, tieteellinen johtaja Juha Haatajan CSC - Tieteellinen laskenta Oy:stä sekä opetusneuvos Erja Heikkisen opetusministeriöstä. Työryhmän tuli saada työnsä valmiiksi 31.10.2005 mennessä

Työryhmä piti seitsemän kokousta ja järjesti kuulemistilaisuudet 19.9.2005 Oulun yliopistossa, 30.9.2005 ja 14.10.2005 Turun yliopistossa. Yritysten edustajille tehtiin sähkö-

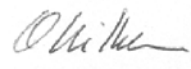
postikysely ja heitä haastateltiin useissa yhteyksissä. Järjestöjen edustajia kuultiin kutsutilaisuudessa 27.9.2005 Helsingissä. Jyväskylässä pidettiin 27.10.2005 avoin keskustelutilaisuus. Työryhmä on lisäksi kuullut Joensuun ja Tampereen yliopiston edustajia. Työryhmä kiittää kaikkia keskusteluihin osallistuneita arvokkaista kommentteista ja näkökulmista.

Tehtävänsä suoritettuaan työryhmä jättää muistionsa opetusministerille.


Helsingissä 1. marraskuuta 2005



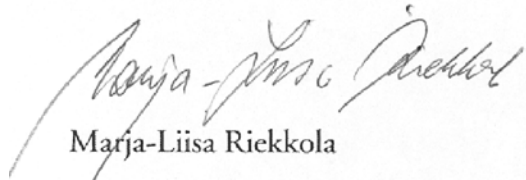
Markku Mattila



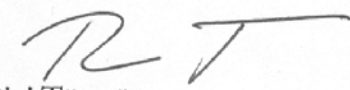
Olli Ikkala



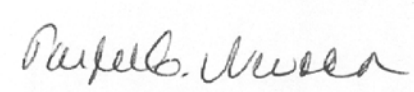
Markus Pessa




Marja-Liisa Riekkola



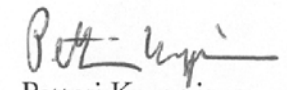
Päivi Törmä



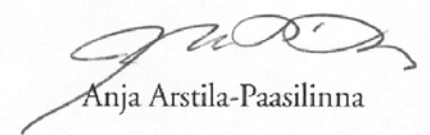
Tarja Nevanen



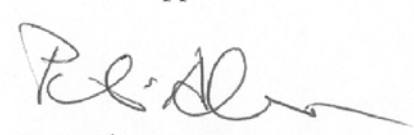
Ari Saarinen



Petteri Kauppinen




Anja Arstila-Paasilinna



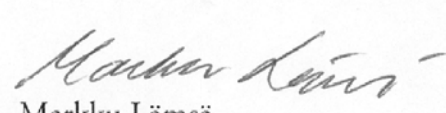
Petri Ahonen



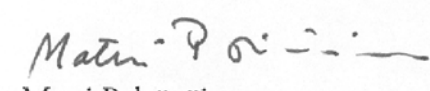
Juha Haataja



Erja Heikkinen



Markku Lämsä



Matti Pylvänäinen

Sisältö

1	Nanotiede ja nanoteknologia	10
2	Nanotiede ja nanoteknologia teollistuneissa maissa	12
2.1	Yhdysvaltain nanoteknologian tutkimus, yritystoiminta ja rahoitus	13
2.2	Japanin nanoteknologian tutkimus, yritystoiminta ja rahoitus	14
2.3	Nanoteknologian tutkimus, yritystoiminta ja rahoitus Euroopassa	14
2.3.1	<i>EU:n nanotieteen ja nanoteknologian toimintaohjelma 2005–2009</i>	16
2.3.2	<i>EU:n tutkimuksen seitsemäs puiteohjelma</i>	17
2.3.3	<i>ESFRI:n ehdotukset tutkimuksen infrastruktuureiksi Euroopassa</i>	18
3	Nanoteknologian terveys- ja ympäristövaikutukset sekä yhteiskunnalliset ja sosiaaliset ulottuvuudet	20
3.1	Nanoteknologia ja terveys	21
3.2	Nanoteknologia ja ympäristö	22
3.3	Nanoteknologian yhteiskunnalliset ja sosiaaliset vaikutukset	22
4	Nanotieteen ja nanoteknologian tutkimus ja koulutus Suomessa	25
4.1	Nanotieteen ja nanoteknologian tutkimus ja tutkimusympäristöt Suomessa	27
4.1.1	<i>Helsinki-Nano – pääkaupunkiseudun nanotieteen ja -tekniikan keskittymä</i>	27
4.1.2	<i>Jyväskylän nanotiedekeskus NSC</i>	34
4.1.3	<i>Tampere-Joensuun nanofotoniikan osaamiskeskittymä</i>	38
4.1.4	<i>Muu nanotieteeseen ja -tekniikkaan liittyvä korkeatasoinen tutkimus</i>	43
4.1.5	<i>Tietotekninen infrastruktuuri</i>	46
4.1.6	<i>Tutkimuksen ja tutkimusympäristöjen sekä koulutuksen rahoitus</i>	48
4.2	Nanotieteen ja nanoteknologian koulutus Suomessa	49
4.2.1	<i>Tutkijankoulutus ja täydennyskoulutus</i>	49
4.2.2	<i>Kandidaatti-, maisteri- ja ammattikorkeakoulutus</i>	51
4.3	Nanoteknologian yhteydet muihin teknologioihin	52
4.3.1	<i>Informaatioteknologia ja elektroniikka</i>	52
4.3.2	<i>Paperinvalmistusteknologia sekä paperi- ja pakkausteollisuus</i>	53
4.3.3	<i>Energiateknologia ja energiantuotanto</i>	54
4.3.4	<i>Bioteknologia, terveydenhuolto ja hyvinvointitekniikka</i>	54
4.3.5	<i>Ympäristötekniikka</i>	55
4.3.6	<i>Koneenrakennustekniikka</i>	55
4.3.7	<i>Rakennustekniikka</i>	56

5	Nanoteknologian innovaatio- ja yritystoiminta Suomessa	57
5.1	Suomalaisten yritysten kiinnostukset ja panostukset nanoteknologiaan	58
5.2	Nanoteknologian tutkimus- ja tuotekehitystoiminta yrityksissä	59
5.3	Yritysten ja tutkimuslaitosten yhteistyö	60
5.5	Nanoteknologian koulutustarve yrityksissä	63
6	Nanoteknologian innovaatiotoiminta ja teknologiansiirto	64
6.1	Teknologiansiirto ja välittäjäorganisaatiot	65
6.2	Nanoteknologian tutkimus- ja tuotekehitysrahoitus	66
6.3	Nanoteknologian liiketoimintaosaaminen	68
7	Nanotieteen ja -teknologian kehittämishaasteet Suomessa	70
7.1	Nanotieteen ja -teknologian osaamiskeskittymien ja keihäänkärkien valintakriteerit	71
7.2	Tietoteknisen infrastruktuurin rakentaminen ja ylläpitäminen	73
7.3	Nanoteknologia mahdollistavana teknologiana	74
7.4	Nanotieteen perus-, jatko- ja täydennyskoulutus	75
7.5	Nanoteknologian ympäristö- ja terveysvaikutusten huomioon ottaminen	76
7.6	Nanoteknologian sosiaalisten ja yhteiskunnallisten vaikutusten huomioon ottaminen	77
7.7	Teknologialiiketoiminnan kehittäminen	78
7.8	Osallistuminen EU:n nanoteknologian infrastruktuurin rakentamiseen	79
7.9	EU:n tutkimuksen seitsemännen puiteohjelman ja nanoteknologian toimintaohjelman hyödyntäminen	79
7.10	Nanoteknologiaohjelman seuranta ohjelmakauden aikana	80
8	Opetusministeriön nanotieteen ja -teknologian kehittämisohjelma vuosina 2007–2009	81
	Liite	83
	Kehittämisohjelman rahoituskriteerit	83
	Keihäänkärkialojen määritelmät	84
	Usein toistuvat lyhenteet	84

1 Nanotiede ja nanoteknologia

Kun kappaleen tai komponentin kokoa pienennetään rajattomasti, syntyy uusia ja erityisiä ominaisuuksia: Ensinnäkin, lähestyttäessä nanometrin ($=0,000000001\text{ m}$) kokoluokkaa kappaleen ominaisuudet alkavat poiketa jyrkästi makroskooppisen kappaleen ominaisuuksista. Ominaisuuksien ymmärtäminen ja hyödyntäminen edellyttävät kvanttimekaniikan käsitteiden ja lainalaisuuksien käyttämistä. Toiseksi, kappaleen pinnan suhteellinen osuus kasvaa. Esimerkiksi 0.1 millimetrin pallossa vain noin joka sadastuhannes atomi on pinnalla, kun taas 1 nanometrin pallossa joka toinen atomi on pinnalla. Tämä on ratkaisevan tärkeää, sillä pinta- ja sisäatomien ominaisuudet ovat keskenään erilaisia. Nämä uudet ominaisuudet alkavat korostua, kun rakenteet ovat alle 100 nanometrin kokoisia (eli alle $0,0000001\text{ m}$).

Nanotieteeksi kutsutaan uutta tiedettä, joka käyttää hyväksi näitä uusia ominaisuuksia uudella tavalla ja uudenlaisten toimintojen aikaansaamiseksi. Perinteinen kemia, biokemia, materiaalitiede tai fysiikka ei yleensä ole nanotiedettä, vaikka raja-aidat voivat olla häilyviä.

Nanotiede ja nanoteknologia on eri yhteyksissä määritelty eri tavoin. Yhteistä näille määritelmille on nanomittakaavasta (0,1–100 nm) johtuvien rakenteiden, laitteiden ja järjestelmien uusien ominaisuuksien, toiminnallisuuden ja hallittavuuden yhdistäminen tutkimuskohteissa. Teknologialla ja tieteellä on eroa: tieteellä tarkoitetaan ilmiöiden ja niiden välisten suhteiden järjestelmällistä tutkimista, ja näin luotua jäsentynyttä tietokokonaisuutta, teknologia on tiedon ja teknisten menetelmien soveltamista käytännön tarpeisiin.¹

Tässä raportissa nanotieteellä tarkoitetaan

- tutkimusmenetelmien ja teknologian kehittämistä makro- ja mikromaailmasta poikkeavien nanomittakaavan uusien ilmiöiden ja prosessien tutkimiseksi
- uusien funktionaalisten atomi- ja molekyyli-tason materiaalien, rakenteiden ja laitteiden karakterisoimista, mallintamista, suunnittelemista ja valmistamista
- uusien nanomittakaavan ilmiöiden ja rakenteiden manipuloimista ja kontrolloimista atomi- ja molekyyli-tasolla

Nanoteknologialla puolestaan tarkoitetaan nanotieteeseen ja nanomittakaavan rakenteisiin perustuvan uuden tekniikan kehittämistä ja nanotieteen hyödyntämistä toiminnallisesti uudentyypisiin materiaaleihin ja laitteisiin.

Määritelmiin sisältyy vahvasti poikkitieteellinen lähestymistapa, koska nanotieteen tutkimuskohteet ja uusien teknologioiden kehittäminen edellyttävät useiden tieteenalojen tutkimustiedon ja -menetelmien uudenlaista ymmärtämistä ja hyväksikäyttämistä. Toisaalta kaikki poikkitieteellinen materiaalitiede ei ole nanotiedettä.

Nanoteknologiaa pidetään mahdollistavana ja kaikkialle läpitunkevana teknologiana. Suomalaiselle yhteiskunnalle ja elinkeinoelämälle nanoteknologia on atomi- ja molekyyli-tason osaamista ja teknologioiden soveltamista innovatiivisten kaupallisten tuotteiden ja prosessien kehittämiseksi. Nanoteknologiaa tukevia teknologioita ovat esimerkiksi informaatio- ja mikroteknologia.

Kemiassa, fysiikassa, biotieteissä, materiaalitieteissä, fotonikassa, ja elektroniikassa on ja tulee olemaan tieteellisesti ja kansantaloudellisesti tärkeitä aloja, jotka eivät kuulu nanotieteen piiriin. Nanotiede ja nanoteknologia eivät ole teknisen edistyneisyyden tai tieteellisen laadun tae, vaan ne ovat yksi uusi yhdistelmä nanokokoisten rakenteiden uusia ominaisuuksia käyttävistä tieteistä ja teknologioista.

¹ NSF. U.S. National Nanotechnology Initiative määrittelee nanoteknologian seuraavasti: 1) Research and technology development at the atomic, molecular and macromolecular levels, in the scale of approximately 1–100 nanometer range; 2) Creating and using structures, devices and systems that have novel properties and functions because of their small and/or intermediate size; 3) Ability to control and manipulate on the atomic scale.

EU. Nanosciences and nanotechnologies are new approaches to research and development that concern the study of phenomena and manipulation of materials at atomic, molecular and macromolecular scales, where properties differ significantly from those at a large scale. (COM2005 243 final. Nanosciences and nanotechnologies: An action plan for future Europe 2005–2009).

TKK, VTT ja JY. Nanotieteen tutkimuksen kohteina ovat nanometrin ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) mittakaavassa tapahtuvat ilmiöt ja prosessit. Nanotiede yhdistävää eri luonnontieteiden, fysiikan, kemian, biologian tutkimusmenetelmiä ja tuloksia. Nanotieteessä mallinnetaan, suunnitellaan, karakterisoidaan ja valmistetaan funktionaalisia atomi- ja molekyyli-tason materiaaleja ja rakenteita. Nanoteknologialla tarkoitetaan toiminnallisesti uudentyypisiin materiaaleihin ja nanomittakaavan (0,1–100 nm) rakenteisiin perustuvien komponenttien ja laitteiden suunnittelemista ja valmistamista erilaisiin sovelluksiin. (Yhteistyöryhmän muistio 2004).

Suomen Akatemia. Akatemia luonnehtii FinNano-tutkimusohjelmaansa kemiallisen, biologisen ja fysikaalisen nanotieteen tutkimusohjelmaksi. Ohjelman aihealueet ovat 1) Ohjattu itsejärjestäytyminen (esimerkkeinä muun muassa bioinspiroidut- ja biomimeettiset materiaalit; keinotekoiset itsejärjestyvät systeemit; sekä kontrolloidut synergistiset materiaalit); 2) Toiminnallisuus nanomittakaavassa (esimerkkeinä muun muassa funktionaaliset keinotekoiset bionalaitteet ja nanosensorit; bioinspiroidut vapautus- ja kuljetustoiminnot; sekä energiansiirto keinotekoisissa järjestelmissä); 3) Nano-objektien ominaisuudet (esimerkinä muun muassa yksittäisten molekyylien ominaisuuksien arviointi; nanoskaalan piirit; mekaniikka, havainnointi ja fotoaktiiviset systeemit; sekä molekyyliuistit).

TEKES. Nanoteknologia on horisontaalinen ja mahdollistava ja siihen liittyy vähintään kolme asiaa: mittakaava, funktionaalisuus ja nanorakenteen hallittavuus. Lähestymistapa on aidosti monitieteinen. FinNano-teknologiaohjelman ideana on nanomittakaavan systeemien ja nanomittakaavassa tapahtuvien ilmiöiden tutkiminen, hyödyntäminen ja kaupallistaminen.

2 Nanotiede ja nanoteknologia teollistuneissa maissa

Nanotieteen ja nanoteknologian kehitys on vasta alkuvaiheessa, vaikka alan tutkimus on edennyt huimin askelin sitten Richard P. Feynmanin visionäärisen puheen *There is plenty of room at the bottom* (1959). Tutkimus on luonut tähän mennessä ennen kaikkea uusia prosessointi-, kasvatus- ja analysointimenetelmiä, jotka mahdollistavat mm. atomien ja molekyylien reaaliaikaisen havaitsemisen ja manipuloinnin (mm. AFM, SEM). Fullereenien ja hiilinanoputkien keksiminen, niiden valmistusteknologioiden nopea kehittyminen, ensimmäiset hiilinanoputkiin perustuvat transistorit ja molekyyllitason virtapiirit sekä molekyyli-moottorit ovat herättäneet runsaasti huomiota ja suuria odotuksia teknologisista sovelluksista. Kiinnostus ja panostukset nanotieteen tutkimuksen ja uusien teknologioiden kehittämiseen ovat kasvaneet niiden myötä nopeasti kaikissa teollistuneissa maissa.

Nanoteknologiaan investoitiin maailmanlaajuisesti arviolta 8,6 miljardia Yhdysvaltojen dollaria vuonna 2004. Julkisten investointien osuus oli tästä vähän yli puolet (4,6 miljardia dollaria). Aktiivisia nanoteknologian start-up -yrityksiä oli vuonna 2004 noin 1 200. Nanotieteestä ja nanoteknologiasta oli tehty kesäkuuhun 2005 mennessä yli satatuhatta tieteellistä julkaisua ja tuhansia patentteja.

Seuraavassa tarkastellaan lyhyesti nanoteknologian suurvaltojen Yhdysvaltain ja Japanin sekä EU:n, Euroopan 'suurvaltojen' ja Suomen kaltaisten pienten maiden nanoteknologiapolitiikkaa. Yritysten nanoteknologian tutkimus- ja tuotekehitysrahoituksesta ei ole käytettävissä tarkkoja tietoja johtuen nanoteknologian laajasta ja jatkuvasti muuttuvasta kentästä, mutta esimerkkejä ja arvioita voidaan esittää.

2.1 Yhdysvaltain nanoteknologian tutkimus, yritystoiminta ja rahoitus

Yhdysvalloissa on kehitetty nanoteknologian tutkimusta, koulutusta ja uutta infrastruktuuria laajasti kansallisen nanoteknologiaohjelman (NNI) käynnistyttyä vuonna 2000. Nopea kasvu on jatkunut ja julkiset panostukset nanoteknologiaan ovat yli kolminkertaistuneet vuoden 2001 tasosta (464 miljoonaa dollaria) vuoteen 2005 (1,6 miljardia dollaria) mennessä.^{2,3}

NNI-ohjelman tavoitteena on hyödyntää nanoteknologian kehityksen myötä yhteiskunta- ja talouselämän sekä sotilasteknologian eri aloilla avautuvia mahdollisuuksia ja saavuttaa kilpailuetua nanotekniikkaan perustuvilla uusilla tuotteilla. Tavoitteen saavuttamiseksi Yhdysvaltoihin on perustettu useita suuria nanoteknologian tutkimus- ja tuotekehityskeskustoja ja kansallisia tutkimuslaitosverkostoja. Nanomaailman ilmiöihin liittyvää fysiikkaa, kemiaa, biologiaa ja teknologiaa integroidaan ja viedään systemaattisesti myös insinöörien ja luonnontieteilijöiden peruskoulutukseen. Nanotiede nostetaan myös esille laskennallisen tieteen kehittämistarpeita käsittelevässä raportissa "Computational Science: Ensuring America's Competitiveness".⁴

Nanoteknologiaan liittyvät ympäristökysymykset ovat sekä koulutuksessa että nanotieteen tutkimuksessa vahvasti esillä. NNI-ohjelmaan sisältyy nanoteknologian yhteiskunnallisten, eettisten, taloudellisten ja koulutuksellisten vaikutusten tutkiminen ja useita näihin liittyviä tutkimusohjelmia on käynnistetty sekä liittovaltion että osavaltioiden rahoittamina. Tavoitteena on nopeuttaa uusien teknologioiden yleistä hyväksyntää ja käyttöönottamista tekeillä niitä laajalti tunnetuksi ja ennakoimalla markkinoiden kehitystä. Kansallisen turvallisuuden nimissä tehtävästä sotilasteknologisesta tutkimuksesta hyötyy Yhdysvalloissa myös siviilipuoli. Kallista kustannusrakennetta paremmin sietävistä sotilasteknisistä sovelluksista avautuu usein uusia edullisia sovelluksia myös siviilipuolelle.⁵

Nanoteknologian t&k-toimintaa rahoittavat liittovaltion tasolla mm. NSF, NASA, puolustus-, energia- ja terveysministeriöt (yhteensä 1,1 miljardia dollaria vuonna 2004), osavaltiot (0,5 miljardia dollaria), suuret kansainväliset yritykset (mm. IBM, Motorola, 3M) joko suoraan tai riskirahoitusyhtiöidensä kautta. Yritysten nanoteknologian t&k-rahoitus on samaa suuruusluokkaa julkisen rahoituksen kanssa (1,7 miljardia dollaria vuonna 2004). Korkeakoulujen, yritysten ja sijoittajien yhteistyö ja nanoteknologiaan liittyvä innovaatio-toiminta on aktiivista erityisesti tiedepuistoissa. Aktiivisia nanoteknologian start-up -yrityksiä oli Yhdysvalloissa vuonna 2004 noin 600.

² Nanotechnology: Where Does the U.S. Stand? Luxresearch, June 29 2005. Luc Research Inc.

³ Kansallisen tiede- ja teknologianeuvoston nanoteknologiaohjelmassa nanoteknologiaan ehdotetaan kohdennettavaksi 1,05 miljardia dollaria liittovaltion rahoitusta vuonna 2006. Ehdotuksen mukaan rahoitusta kohdennetaan 1) nanotieteen perustutkimukseen (234 miljoonaa dollaria); 2) nanomateriaalien tutkimukseen (228 miljoonaa dollaria); 3) nanolaitteiden ja järjestelmien tutkimukseen (244 miljoonaa dollaria); 4) nanoteknologian laite-, mittaustekniikan ja standardien tutkimukseen (71 miljoonaa dollaria); 5) rakennustekniikan tutkimukseen (47 miljoonaa dollaria); 6) suurten tutkimuskeskittymien infrastruktuureihin ja laitteistoihin (148 miljoonaa dollaria); 7) nanoteknologian sosiaalisten ulottuvuuksien tutkimukseen (82 miljoonaa dollaria). Lähde: The National Nanotechnology Initiative. Research and Development Leading to a Revolution in Technology and Research. Supplement to the President's 2006 Budget. Nanoscale Science, Engineering, and Technology Subcommittee. Committee on Technology. National Science and Technology Council. March 2005.

⁴ Computational Science: Ensuring America's Competitiveness. President's Information Technology Advisory Committee. Report to the President. June 2005. www.nitrd.gov/pitac/reports/20050609_computational/computational.pdf

⁵ Esim. MIT Institute of Soldier Nanotechnologies, <http://web.mit.edu/isn>.

2.2 Japanin nanoteknologian tutkimus, yritystoiminta ja rahoitus

Nanoteknologia on keskeistä Japanin strategisissa suunnitelmissa rakentaa maahan uutta teollisuutta ja elvyttää maan taloutta. Japanilaiset tutkijat ovat tehneet viimeisen kymmenen vuoden aikana nanoteknologiassa useita tieteellisiä ja teknologisia läpimurtoja. Tutkimuskeskuksissa luotua uutta teknologiaa siirretään jo monilla aloilla tuotantoon.

Japanilla on teollistuneista maista kaikkein kunnianhimoisin valtiojohtoinen ja julkisin varoin rahoitettu nanoteknologiaohjelma. Nanoteknologian julkinen t&k -rahoitus on Japanissa lähes samaa suuruusluokkaa kuin Yhdysvalloissa. Tutkimusresursseja kohdennetaan Japanissa sekä perustutkimukseen että fokusoidusti tietyille nanoteknologian aloille, mm. nanorobottien ja molekyylien manipuloinnissa tarvittavien teknologioiden kehittämiseen. Japaniin on perustettu viime vuosina useita suuria nanoteknologian tutkimuslaitoksia, kehittämiskeskuksia ja tuotantolaitoksia.

Japanilaiset yritykset ovat olleet aktiivisia uusien teknologioiden tutkimisessa ja kehittämisessä. Fuji, HP, Hitachi, NEC ja Sony ovat käynnistäneet mittavia nanoteknologian tutkimus- ja tuotekehityshankkeita. Tekstiilejä, synteettisiä kuituja ja kemikaaleja valmistavan Toray Industries -yhtiön 40 miljoonan euron nano- ja bioteknologiakeskus on juuri valmistunut Tokion lähelle.

2.3 Nanoteknologian tutkimus, yritystoiminta ja rahoitus Euroopassa

Euroopan mailla ei ole yhtenäistä nanoteknologiastategiaa. Euroopan johtavissa maissa on kuitenkin kohdennettu lisävaroja nanotieteen perustutkimukseen, tutkijankoulutukseen ja teknologiasiirtoon, käynnistetty kansallisia nanoteknologiaohjelmia ja rakennettu poikkiteollisia tutkimus- ja kehittämiskeskuksia. EU on tukenut nanotieteen tutkimusta sekä uusien nanoteknologioiden ja niihin liittyvän yritystoiminnan kehittämistä mm. suunnatuilla tutkimusohjelmilla (EU:n tutkimuksen 6. puiteohjelman *Nanotechnologies and nanosciences, knowledge-based multifunctional materials and new production processes and devices*) ja rahoittamalla investointeja nanotieteen ja -teknologioiden tutkimus- ja kehittämiskeskuksiin ja tukemalla verkostojen rakentamista. Euroopan investointipankki tukee mm. Euroopan suurimman mikro- ja nanoelektroniikan tutkimuskeskuksen rakentamista Leuveniin. Hankkeen kustannusarvio on 84 miljoonaa euroa ja sen keskeisenä tavoitteena on taata belgialaisen tutkimuslaitoksen IMEC:n johtava asema nanoluokan IC-komponenttien prosessoinnissa.

EU-maat haluavat parantaa talousalueen teknologista ja taloudellista kilpailukykyä lisäämällä tutkimuspanostusta. Tavoitteena on nostaa tutkimusmenojen osuus 3 %:iin bruttokansantuotteesta vuoteen 2010 mennessä. Strategisia lisäpanostuksia kohdennetaan mm. nanotieteen tutkimukseen ja uusien nanoteknologioiden kehittämiseen. Euroopassa tunnetaan huolta myös siitä, ettei tutkimuspanostuksia ja hyviäkään tutkimustuloksia ole pystytty hyödyntämään teknologisesti ja taloudellisesti yhtä tehokkaasti kuin esim. Yhdysvalloissa ja Japanissa. Tämän "eurooppalaisen paradoksin" toistuminen halutaan nanoteknologian kehityksessä välttää mm. integroimalla yritykset alun alkaen uusien teknologioiden kehittämiseen, tukemalla alan investointeja, kehittämällä eurooppalaisia standardeja ja kouluttamalla alalle uutta työvoimaa.

Euroopan maista merkittäviä nanoteknologian rahoittajia ovat mm. Saksa, Ranska ja Iso-Britannia. *Saksassa* (nanoteknologian investoinnit ovat noin 240 miljoonaa euroa vuodessa)

tuetaan nanotieteen perustutkimusta laajasti ja t&k-toimintaa Saksan talouden avainaloilla (mm. autoteollisuus, ICT ja kemikaalit) ja uusilla teollisuusaloilla (mm. biotekniikka, optoelektroniikka ja lääketiede). Saksaan on perustettu kuusi nanoteknologian osaamiskeskusta⁶, useiden saman tai läheisen alan tutkimuslaitosten ja yritysten klusteria. Saksassa tuetaan julkisin varoin myös tutkijankoulutusta ja teollisuuden tutkimushankkeita. BASF:lla ja Siemensillä on laajaa nanoteknologiaan liittyvää liiketoimintaa. Saksaan on syntynyt runsaasti uusia nanopartikkeleita, instrumentteja, mikroskooppeja (mm. AFM ja SPM), optoelektroniikkaa, nanokomposiitteja, sensoreita, diagnostiikkaa, pinnoitteita ja polttokennoja valmistavia teknologiayrityksiä.

Ranskassa (170 miljoonaa euroa vuodessa) nanoteknologian ja mikroelektroniikan t&k-rahoituksella rakennetaan tutkimuskeskuksia (mm. MINATEC Grenoblessa) ja tuetaan perustutkimusta, tutkijankoulutusta sekä tutkimuslaitosten ja teollisuuden yhteisiä kehityshankkeita. Parhaillaan keskustellaan valtiojohtoisen nanoteknologiaohjelman tarpeellisuudesta.

Iso-Britannia (130 miljoonaa euroa vuodessa) tukee julkisella rahoituksella sekä nanoteknologian t&k-toimintaa että teknologian kaupallistamista. Tutkimuskeskukset on rakennettu mm. Newcastleen, Durhamiin, Cambridgeen (mm. nanorakenteet, funktionaaliset nanorakenteiset polymeerit, bio- ja orgaaniset materiaalit, nanolitografia ja kvanttilaskenta, ohutkalvot), Oxfordiin (poikkiteollinen nanoteknologia) ja Lontooseen. Valtion varoja käytetään myös tutkimuslaitosten verkottumisen tukemiseen. Merkittävän julkisen rahoituksen odotetaan indusoivan yritysten ja paikallisten toimijoiden investointeja nanoteknologiaan. Nanoteknologiaan on kohdennettu huomattavia pääomasijoituksia ja uusia yrityksiä on syntynyt tutkimuskeskusten yhteyteen.

Hollanti (50 miljoonaa euroa vuodessa) on nanotutkimuksen edelläkävijöitä Euroopassa. Nanotieteen tutkimusta tehdään kaikissa suurissa yliopistoissa (Twente, Delft, Groningen, Wageningen, Amsterdam, Nijmegen, Eindhoven) ja TPD-tutkimuskeskuksessa. Yliopistot ja TPD ovat perustaneet konsortion (*NanoNed*) koordinoimaan ja edistämään nanotieteen tutkimusta ja uusien teknologioiden kehittämistä. Konsortion yrityspartnereita ovat mm. Philips, DSM, Unilever, ASML, ASMI ja Avantum.

NanoNedin käynnistämä 235 miljoonan euron kansallinen ohjelma (2004–2008) keskittyy yhteentoista kansallisesti vahvan tutkimusalan ja taloudellisin perustein valittuun lippulaivaohjelmaan⁷. Jokaisessa ohjelmassa työskentelee noin 50 päätoimista tutkijaa. Lippulaivoilla on useita teollisuuspartnereita. NanoNed on luonut Twenten, Delftin ja Groningenin laboratorioista kansallisen nanoteknologialaboratorion NanoLab NL, johon investoidaan 110 miljoonaa euroa seuraavien seitsemän vuoden aikana. NanoLab NL koordinoi, tutkimuslaitteiden käyttöä, tariffeja, investointeja sekä erityisesti pienten ja keskisuurten teknologiain-
tensiivisten yritysten kanssa tehtävää yhteistyötä.

Ruotsissa (20 miljoonaa euroa) tehtävä nanotieteen tutkimus keskittyy infrastruktuuriltaan korkeatasoisiin Chalmersin teknilliseen korkeakouluun, Lundin yliopistoon, Kuninkaalliseen teknilliseen korkeakouluun (KTH), Uppsalan yliopistoon ja Linköpingin yliopistoon. Pää-tutkimusaloja ovat mm. hiilinanorakenteet, kvanttimateriaalit, fotonikka ja kvanttioptiikka, magneettiset materiaalit, funktionaaliset pinnat ja bionanotiede. Tutkimuslaitokset tekevät yhteistyötä teollisuuden kanssa.

⁶ Competence Centres for Nanotechnology: Functionality through Chemistry, Application of Nanostructures in Optoelectronics, Ultrathin Functional Films, Ultraprecise Surface Processing, Nanoanalytics and Micro-nanowelten.

⁷ The NanoNed flagships: NanoFluidics, Nano Electronic Materials, Advanced NanoProbing, Chemistry and Physics of Individual Molecules, NanoSpintronics, NanoInstrumentation, Bottom-up Nano-Electronics, BioNanoSystems, Quantum Computing, NanoFabrication, NanoPhotonics. <http://www.nanoned.org/>

Ruotsilla ei ole vielä kansallista nanoteknologiasta strategiaa. SSF (Stiftelsen för Strategisk Forskning) ja Vetenskapsrådet rahoittavat nanotieteen tutkimusta puhtaasti tieteellisin perustein. SSF rahoittaa materiaalitieteiden ja mikroelektroniikan nanotutkimushankkeita. Suomen Tekesin kaltainen VINNOVA tukee poikkitieteellistä nanoteknologiasta hanketta (BIO-NANO-IT) ja valmistelee parhaillaan kansallista nanoteknologiasta strategiaa. Rahoitettavia nanoteknologian tutkimushankkeita on tällä hetkellä 30–40 ja tutkimusrahoituksen kokonaisvolyyymi on noin 8 miljoonaa euroa vuodessa. Lundin yliopistossa käynnistettiin vuonna 2003 poikkitieteellinen nanoteknologian koulutusohjelma.

Suuret maat Euroopassa panostavat nanotieteen perustutkimukseen ja nanoteknologioiden kehittämiseen laajasti. Pienet maat ovat tehneet valintoja vahvuksiensa ja kansallisten intressiensä perusteella, esimerkkinä Hollannin lippulaivaohjelmat. Yhteistä kaikille kehittyneille maille – Sveitsiä lukuun ottamatta – on investoiminen suuriin yliopistovetoisiin t&k-keskuksiin (infrastrukturi ja henkilöstö), tutkimuslaitosten ja yritysten yhteisiin hankkeisiin ja verkostoitumiseen sekä nanoteknologian innovaatiotoiminnan ja teknologiansiirron tukemiseen. Julkisten investointien kannustamina myös yritykset ovat investoineet nanoteknologiaan. Sveitsi on hyvä esimerkki pienestä maasta, joka panostaa merkittävästi nanoteknologian innovaatioihin ja kaupallisiin sovelluksiin sekä nanotieteen ja nanoteknologian perustutkimukseen.⁸

2.3.1 EU:n nanotieteen ja nanoteknologian toimintaohjelma 2005–2009

Yhtenäisen teknologiasta strategian puute on lisännyt huolta Euroopan unionin talousalueella tehtyjen investointien, tietämyksen ja osaamisen sekä satojen miljardien eurojen nanoteknologiamarkkinoiden hyödyntämisen vähäisyydestä. Komissio teki keväällä 2004 ehdotuksen Euroopan nanoteknologiasta strategiaksi *"Towards an European Strategy for Nanotechnology"*, jonka pohjalta komissio hyväksyi 7.6.2005 nanotieteen ja -tekniikan toimintaohjelman *"Nanosciences and nanotechnologies: An action plan for Europe 2005–2009"*.

Toimintaohjelman tavoitteena on kasvattaa koordinoitusti nanotekniikan t&k-investointeja ja luoda Eurooppaan maailmanluokan infrastruktuureja, poikkitieteellistä nanotekniikan tutkimusta ja koulutusta sekä yrittäjyyttä ja teollisuutta. Ohjelmassa korostetaan yliopistojen, tutkimuslaitosten ja teollisuuden yhteistyön merkitystä, samoin nanotekniikan yhteiskunnallisten innovaatioiden, terveys-, ympäristö- ja turvallisuusnäkökohtien ja kansalaismielipiteen huomioon ottamista. Toimintaohjelman mukaan myös valtioiden omat ja alueelliset voimavarat (2/3 kaikista nanotekniikan julkisista investoinneista) tulisi kohdentaa koordinoitusti taloudelliset näkökohdat sekä koulutukseen, tutkimukseen ja innovaatiotoimintaan liittyvät synergiat huomioon ottaen. Ohjelmassa kannustetaan jäsenvaltioita hyödyntämään Euroopan investointipankkia (EIB) nanotekniikan investoinneissa.

Komission mukaan tavoitteena on maailmanluokan infrastruktuurien, osaamiskeskusten ja verkostojen luominen Eurooppaan, ja se kehottaa jäsenmaita edistämään niiden syntymistä. Komissio korostaa ajanmukaisen koulutuksen merkitystä, ilmoittaa tutkivansa mahdollisuudet tukea uuden sukupolven koulutusohjelmia ja kansainvälistä tohtorikoulutusta sekä kehottaa jäsenvaltioita tehostamaan laaja-alaista yrittäjyyden, yhteiskunta- ja ihmistieteet huomioon ottavaa poikkitieteellistä koulutusta.

⁸ Sveitsi on rahoittanut myös soveltavaa tutkimusta ja teknologiansiirtoa: Vuosina 2000-03 toteutetussa Top nano 21 -ohjelmassa paino oli nanotekniikan sovelluksissa, ja tavoitteena oli vahvistaa maan taloutta. Ohjelmassa rahoitettiin 10 miljoonalla eurolla noin 200 tieteellistä ja teollista projektia. Helsinki-Nano (2005). Helsinki-Nano -hankkeen loppuraportti.

Komission mukaan nanoteknologia mahdollistaa uusien innovaatioiden ja sovellusten syntymisen monilla teknologian aloilla. Komissio ilmoittaa tukevansa aiempaa paremmin teollisuuden osallistumista t&k-hankkeisiin jouduttaakseen uusien teknologioiden omaksumista perinteisillä teollisuusaloilla sekä tietointensiivisten pk- ja alkavien yritysten syntymistä. Komissio tutkii mahdollisuudet tukea pk-yritysten nanoteknologian pilotti- ja demonstraatioprojekteja. Jäsenvaltioita komissio kehottaa tukemaan pk-yritysten ja yritysalkujen, tutkimuslaitosten, yliopistojen ja sijoittajien alueellisten klustereiden syntymistä ja vahvistumista.

Komissio tukee nanoteknologiaan liittyvien turvallisuus-, terveys- ja ympäristöriskien tunnistamista ja hallintaa sekä ryhtyy tarvittaessa toimiin turvallisuusnormien kehittämiseksi.

Komissio pitää tärkeänä kansainvälistä yhteistyötä myös teknologistuvien valtioiden ja lähialueiden kanssa ja kehottaa jäsenvaltioita tukemaan kestävästä kehityksestä kehitysmaissa mm. osallistumalla teknologiahankkeisiin, joiden tavoitteena on turvata puhdas vesi, terveellinen ravinto, lääkkeiden tehokas jakelu, tehokas ja edullinen terveystarkastus ja energiahuolto.

Suomella voi olla joillakin nanoteknologian aloilla merkittävä asema eurooppalaisten osaamiskeskusten verkostoissa ja uuden yritystoiminnan synnyttämisessä omat voimavaransa kokoamalla ja omaa infrastruktuuria rakentamalla. Se edellyttää Suomelta oikeanlaista panostamista nanoteknologian tutkimukseen, koulutukseen ja innovaatiotoimintaan omassa maassa. Suomi ja suomalaiset yritykset voivat osallistua myös komission tarkoittamaan kansainväliseen yhteistyöhön teknologistuvien valtioiden ja lähialueiden kanssa esimerkiksi nanoteknologian sovelluksia ja palveluja kehittämällä ja markkinoimalla.

2.3.2 EU:n tutkimuksen seitsemäs puiteohjelma

Euroopan komissio julkisti keväällä 2005 suunnitelmansa tutkimuksen seitsemänneksi puiteohjelmaksi. Komissio ehdottaa puiteohjelman kestoksi seitsemän vuotta (2007–2013) ja kokonaisbudjetiksi 72,73 miljardia euroa. Ohjelman tavoitteena on edesauttaa Euroopan kehittymistä maailman johtavaksi talousalueeksi ja tukea tavoitetta nostaa tutkimusmenojen osuus 3 %:iin kansantuotteesta Lissabonin ja Barcelonan julistusten mukaisesti.

Seitsemäs puiteohjelma koostuu neljästä osiosta: *yhteistyö, ideat, ihmiset ja valmiudet*, joiden yhteisenä tavoitteena on eurooppalaisten osaamiskeskittymien ja verkostojen vahvistaminen ja luominen.⁹

Yhteistyö-ohjelma on budjetiltaan (45 miljardia euroa) selvästi suurin ja sen tarkoituksena on tukea valtioiden rajat (ml. kolmannet maat) ylittävää tutkimusyhteistyötä. Ohjelmassa toteutettavia toimia ovat muun muassa yhteiset tutkimushankkeet, yhteiset teknologiaohjelmat, kansallisten tutkimusohjelmien koordinointi ja kansainvälinen yhteistyö. Nanotieteet, nanoteknologia, materiaalit ja uudet tuotantoteknologiat on yksi yhteistyöohjelman yhdeksästä temaattisesta alueesta.¹⁰ *Ideat*-ohjelmassa (11,9 miljardia euroa) tuetaan eri alojen perustutkimusta tutkimusryhmien tekemien esitysten perusteella ERC:n (European Research Council) kautta. *Ihmiset*-ohjelmassa (7,1 miljardia euroa) tuetaan mm. tutkijoiden koulutusta (Marie Curie -verkostot), urakehitystä ja kansainvälistä tutkijanvaihtoa. *Valmiudet*-

⁹ <http://www.tekes.fi/eu/fin/7pol/index.html>

¹⁰ Yhteistyöohjelmassa on yhdeksän temaattista aluetta: terveys; elintarvikkeet; maatalous ja bioteknologia; tieto- ja viestintätekniikka (12,7 miljardia euroa); nanotiede, nanoteknologia, materiaalit ja uudet tuotantoteknologiat (5 miljardia euroa); energia; ympäristö ja ilmastomuutokset; liikenne; yhteiskunta- ja taloustieteet sekä humanistiset tieteet (0,8 miljardia euroa) sekä turvallisuus ja avaruus (4 miljardia euroa).

ohjelma (7,5 miljardia euroa) tukee eurooppalaisen tutkimusinfrastruktuurin kehittämistä, pk-yritysten innovaatiotoiminnan vahvistamista, alueellisten tutkimus- ja innovaatioklustereiden kehittämistä, EU:n 'lähentymisalueiden' tutkimuspotentiaalin valjastamista sekä tieteen ja yhteiskunnan vuorovaikutuksen parantamista.

Suomella voi olla – kokoamalla omat (tutkimuslaitosten ja yritysten) voimavarat – joillakin nanoteknologian aloilla EU:n tutkimuksen 7. puiteohjelmassa näkyvä rooli, niin teknologiavetoisessa 'yhteistyö'-ohjelmassa kuin siihen sisältyvässä 'nanotiede, nanoteknologia, materiaalit ja uudet tuotantoteknologiat'-ohjelmassa. Menestyminen 'ihmiset', 'ideat' ja 'valmiudet' -ohjelmissa edellyttää kansainvälisesti korkeatasoista tutkimusta ja infrastruktuuria omassa maassa sekä aktiivista ja pitkäjänteistä t&k-yhteistyötä alan muiden eurooppalaisten tutkimus- ja teknologiakeskusten kanssa.

2.3.3 ESFRI:n ehdotukset tutkimuksen infrastruktuureiksi Euroopassa

Nanotiede ja -teknologia ovat nousemassa EU:n seuraavassa tutkimuksen puiteohjelmassa yhdeksi keskeisimmäksi painopistealueeksi. Euroopassa luodaan samalla rakenteita tutkimusrahoituksen ja tutkimusinfrastruktuurien kehittämiseksi yhteisin ponnistuksin.

Tulevaan tutkimusinfrastruktuuriin liittyy läheisesti tieteen tietotekninen infrastruktuuri, jota kehitetään muun muassa nykyisissä EU:n rahoittamissa grid-projekteissa. Jotta Suomi voisi jatkossa olla varteenotettava kumppani EU:n isoille valtioille, tarvitaan riittäviä kansallisia panostuksia sekä tietotekniseen kehitystyöhön että tarjottavien palvelujen kehittämiseen ja ylläpitämiseen.

ESFRI:n (The European Strategy Forum on Research Infrastructures) Euroopan komissiolle jättämään infrastruktuuriohjelmaan "List of Opportunities"¹¹ sisältyy nanotieteeseen ja nanoteknologiaan liittyviä ehdotuksia. *Pan-European research Infrastructure for Nano-Structures (PRINS)* -hankkeen tavoitteena on ajanmukaisen tutkimusinfrastruktuurin rakentaminen teknologioiden ja Euroopan johtavien tutkimuslaitosten ja eri alojen tutkijoiden voimavarojen yhdistämiseksi nanoelektroniikan tutkimuksessa. PRINS on tarkoitus rakentaa olemassa olevien suurten tutkimuskeskusten varaan kahdessa vaiheessa siten, että ensimmäisessä vaiheessa 2007–2010 rakennetaan nanoelektroniikan infrastruktuuri kehittyneen piitekniologian hyödyntämistä varten (600–800 miljoonaa euroa) ja eri teknologioiden ja nanovalmistusteknologioiden integroimista varten (400–600 miljoonaa euroa). Toisessa vaiheessa vuosina 2011–13 on tarkoitus rakentaa nanoelektroniikan infrastruktuuri kehittyneitä, nanoteknologiaan perustuvia valmistusmenetelmiä varten (300 miljoonaa euroa).¹²

European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) tarjoaa projektiehdotuksessaan "*A light for Europe*" tehokasta synkrotronisäteilylähdettä nanotieteen ja nanoteknologian tutkimukseen. Hanke-ehdotuksen mukaan 20 nanometrin suihkua voidaan käyttää mm. nanomateriaalien valmistukseen, pehmeiden ja biomateriaalien tutkimukseen ja nanomittakaavan

¹¹ European Strategy Forum on Research Infrastructures – ESFRI (2005). Towards New Research Infrastructures for Europe: The ESFRI "List of Opportunities".

¹² Phase 1 (2007–10): Research Infrastructure for ultimate silicon processing research infrastructure, for nanometer-scale metrology and characterization, for integration in and above silicon of disruptive structures and for a first demonstration of the "bottom-up fabrication", while reinforcing the European leadership in equipments and materials. Phase 2 (2011–2013): Research Infrastructure for combination of top-down/bottom-up based nanofabrication (molecular manipulation, on-chip positioning, control at the nanometer scale) of devices and circuits.

elektronisten komponenttien valmistukseen. Hankkeen kustannusarvio on 200 miljoonaa euroa.

ESFRI:n listalta löytyvässä projektiehdotuksessa *HPCEUR (High Performance Computing for Europe)* on tarkoitus rakentaa Eurooppaan kestävä infrastruktuuri ja tukipalvelu suurten tieteellisten ja teknologisten hankkeiden maailmanluokan tietokonesimulointeja varten. Verkostoon yhdistetään Euroopan merkittävät kansalliset superlaskennan keskuskeskukset. Hankkeen kustannusarvio on 250 miljoonaa euroa ja laskentakapasiteetin pitäminen ajan tasalla edellyttää infrastruktuurin uusimista kahden - kolmen vuoden välein. Vuosittaiset operointikustannukset ovat 40–60 miljoonaa euroa. HPCEUR ei investoi kansallisiin resursseihin. Painopiste on palveluissa, ei laitteissa. Mukaanpääsy edellyttää kansallisen tason resursseja. HPCEUR-verkostoa esitetään rakennettavaksi toukokuussa 2004 käynnistyneen DEISA-projektin pohjalta. Suomi kuuluu DEISA:n kahdeksan perustajajäsenen joukkoon. Suomessa vuoden 2006 valtion talousarvioesitykseen sisältyvä superkoneen tilausvaltuutus vuosille 2007–2009 osuu HPCEUR-projektin kannalta oikeaan ajankohtaan. DEISA:n puitteissa on käynnistetty eurooppalaisten suurten laskentahankkeiden valintamenettely. Suomalaiset hankkeet pärjäsivät hyvin, mukana on myös nanotieteen projekteja. DEISA:n kokonaisrahoitus on 23,7 miljoonaa euroa neljälle vuodelle. Projektin loppukaudelle haetaan parhaillaan lisärahoitusta.

DEISA:n lisäksi eurooppalainen grid-projekti EGEE on laskennallisen nanotieteen kannalta tärkeä. Sen kokonaisrahoitus on 53,2 miljoonaa euroa kahdelle vuodelle. Myös EGEE on parhaillaan hakemassa lisärahoitusta ja uusia kumppaneita. Suomesta CSC on mukana lisärahoitushakemuksessa.

Suomalaisen infrastruktuurin voi nykyisellään katsoa olevan vaatimaton, sillä Suomessa ei ole muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta (mm. CSC) suuria kansallisia infrastruktuureja. Ilman vahvaa kansallista yhteistyötä Suomi ei ole vahvoilla kilpailtaessa eurooppalaisen infrastruktuurin rakentamisesta. CSC:n ja suomalaisten huipputason tutkimusyksiköiden tulee yhdessä edistää tutkimusyhteisön kilpailukykyä nykyisissä DEISA- ja EGEE-projekteissa sekä ehdotetussa HPCEUR-projektissa. Mukaan pääsy ja päätöksiin vaikuttaminen edellyttää uskottavia kansallisia investointeja ja panostuksia myös laskennallisen tieteen palveluihin. Muuten jäämme isojen maiden varjoon. Suomen on syytä hakeutua yhteistyöhön myös Suomen kaltaisten pienten maiden kanssa, esimerkiksi muiden Pohjoismaiden kanssa.

3 Nanoteknologian terveys- ja ympäristövaikutukset sekä yhteiskunnalliset ja sosiaaliset ulottuvuudet

Nanoteknologian käyttömahdollisuudet ovat ennakoitavissa olevassa tulevaisuudessa periaatteellisesti suuret. Teknologiaintensiivisissä sovelluksissa, kuten nanoteknologiassa, menestykseen tarvitaan tuoteidea, oivallus teknisestä toteutuksesta ja prosessista, oivallus taloudellisesta toteutuksesta, kaupallinen osaaminen ja riskirahoitus. Nanoteknologiaa voidaan käyttää mm. entistä kestävämpien, raaka-aineita ja energiaa säästävien materiaalien ja kulutus-hyödykkeiden valmistamiseen, veden ja maaperän puhdistamiseen, terveellisen ravinnon tuot-tamiseen, lääkkeiden tehokkaaseen kohdistamiseen, edullisiin terveystarkastuksiin ja energia-huollon parantamiseen. Pitemmällä aikavälillä nanoteknologiaa voidaan soveltaa nykyisten miniatyrisointiin perustuvien tuotantoprosessien korvaamiseen nanorakenteiden kasvattami-seen perustuvilla prosesseilla, mikä voi mullistaa koko tuotantoprosessin.

Nanoteknologiaa soveltamalla voidaan säästää raaka-aineita, ympäristöä sekä lisätä hyvin-vointia ja tuottavuutta. Nanoteknologiaan ja sen laajamittaiseen soveltamiseen liittyy kerran-naisvaikutuksia – terveys-, ympäristö- ja sosiaalisia riskitekijöitä – jotka on otettava huomioon jo suunnitteluvaiheessa ja joihin on varauduttava esimerkiksi standardeja, lainsäädäntöä ja yhteiskuntapolitiikkaa kehittämällä. Tutkimattomat riskitekijät voivat haitata nanoteknolo-gian soveltamista, yritystoimintaa ja yhteiskunnallista kehitystä. Vastaavasta on esimerkkejä teknologiahistoriasta, mm. biotekniikassa ja ydinvoimatekniikassa.

Suomessa nanoteknologian osaamis pohjaa ja kaupallistamismahdollisuuksia on vielä analysoitu vähän. Etlatieto Oy:n kaksivuotinen hanke "Nanotechnology and the Renewal of Finnish Industries" hyväksyttiin Tekesin FinNano -teknologiaohjelmaan lokakuussa 2005. Projekti tuottaa tarkemman kuvan Suomen nanoteknologiakehityksen taustoista, keksijä- ja yrityspopulaatiosta ja verkostoista, nanoteknologian tosiasiallisista ja mahdollisista kytken-nöistä muihin teknologia- ja toimialoihin sekä olemassa oleviin teollisiin klustereihin. Han-keen tulosten toivotaan auttavan intressiryhmiä tunnistamaan nanoteknologiaan liittyvät eri-tyispiirteet ja toteutettujen toimenpiteiden vaikutukset.¹³

¹³ Tekes -projekti; Nanotechnology and the renewal of Finnish industries, Pekka Ylä-Anttila, Christopher Palmberg, Etlatieto Oy, 2005–2007.

3.1 Nanoteknologia ja terveys

Terveydenhuollossa nanopartikkelien diagnostisia ja hoitokäyttömahdollisuuksia tutkitaan sekä akateemisesti että yrityksissä. Pienen koon ja uudenlaisen toiminnallisuuden yhdistäminen antaa toivoa saada hallintaan nykyisin parantamattomissa olevia sairauksia sekä diagnosoida tautitiloja entistä aikaisemmissa vaiheissa, jolloin hoidot ovat tehokkaampia.

Muidenkin kuin terveydenhoitoon tarkoitettujen nanopartikkeleiden ja -materiaalien terveysvaikutukset on arvioitava. Pienuudesta johtuva läpäisykyky ja pinta-aktiivisuus mahdollistavat uusia ja hyödynnettäviä ominaisuuksia, mutta mahdollisesti myös odottamattomia haitallisia ominaisuuksia, aivan kuin mikä tahansa uusi innovaatio. Nanopartikkelit voivat ohjautua ja kerääntyä eläviin soluihin hengityksen, ruuansulatuksen ja ihon kautta, ohittaa immuunipuolustusjärjestelmän ja reagoida odottamattomalla tavalla esimerkiksi proteiinien kanssa, aiheuttaa hyytymiä veressä jne. Nanoputket voivat vahingoittaa suurina määrinä hengitettyinä keuhkoja.¹⁴ Riskejä ei pidä liioitella, mutta ne on tutkittava, kuten muissakin uusissa tekniikoissa. Epätodennäköistenkin uhkatekijöiden selvittäminen edesauttaa tutkimusmyönteisen ilmapiirin säilymistä Suomessa.¹⁵ Tärkeintä on, että päätöksenteko tapahtuu eri materiaalien kohdalla tutkimustulosten eikä luulojen ja pelkojen perusteella.

Nanopartikkeli- ja nanomateriaalialistutus voi tapahtua tutkimuslaboratorioissa, tuotantolaitoksissa ja nanomateriaaleihin perustuvia tuotteita käytettäessä. Näitä riskejä on toistaiseksi tutkittu vähän. Nanopartikkelien ja -materiaalien valmistamiseen liittyy muita nanomittakaavaan liittymättömiä tuotantoprosessin suuria riskejä, joiden tutkiminen on ollut tärkeämpää. Tuotteisiin liittyvät nanomittakaavasta aiheutuvat riskitekijät voivat pahimmillaan koskea suuria ihmismääriä, minkä vuoksi nanopartikkeleihin ja nanomateriaaleihin liittyvät uhkatekijät ovat riskinäkökulmasta keskeisiä tutkimus- ja minimointikohteita. Yleisesti tunnettujen testien ja varmennusmenettelyiden puute aiheuttaa epäluuloja ja pelkoja nanoteknologiaa kohtaan. Tiedon puute vaikuttaa suoraan myös yritysten halukkuuteen investoida nanoteknologiaan.¹⁶

Sekä Yhdysvaltain kansallisessa nanoteknologiaohjelmassa (NNI) että EU:n tutkimuksen 7. puiteohjelmassa ja nanoteknologian toimintasuunnitelmassa korostetaan nanoteknologian mahdollisten terveys- ja ympäristövaikutusten perustutkimuksen merkitystä, samoin välttämättömyyttä säätää yhteiset nanopartikkelien käsittelynormit. Näissä ohjelmissa osoitetaan rahoitusta myös nanoteknologian terveys- ja ympäristövaikutusten tutkimiseen.

Suomella voi olla joillakin aloilla (esimerkiksi ultrapienet hiukkaset) merkittävä asema nanoteknologian terveysvaikutustutkimuksessa. Aktiivisten tutkimusryhmien kautta välitetään tehokkaasti tietoa myös muualla tehtävästä tutkimuksesta, mikä on tarpeen mm. standardeista ja lainsäädännöstä päätettäessä. Lisäksi nanoteknologiaan ja sen terveysvaikutuksiin liittyvää osaamista yhdistämällä voidaan kehittää kansainvälisiin tarpeisiin mm. testaus- ja diagnosointitekniologiaa.

¹⁴ Arnall, A. H. (2003). *Future Technologies, Today's Choices*. Imperial College London. Michelson, E. (2004). Michelso, Evan (2004). *Analyzing the European Approach to Nanotechnology*. Dürrenberg, F., Höck, J., Höhener, K. (2004). *Safety and Risks of Nanotechnology*. TEMAS AG.

¹⁵ VTT on merkittävässä partnerina mukana EU:n tutkimuksen 6. puiteohjelman rahoittamassa NanoSafe2-projektissa, jossa kehitetään nanohiukkasten terveysvaikutusten tutkimisen mittaus- ja kartoittamismenetelmiä. www.nanosafe.org.

¹⁶ Nanotechnology; Where Does the U.S. Stand? Luxresearch, June 29, 2005. Luc Research Inc.

3.2 Nanoteknologia ja ympäristö

Nanoteknologia voi tuottaa merkittäviä positiivisia vaikutuksia ympäristöön kehittämällä uusia, energiaa ja materiaaleja säästäviä valmistusmenetelmiä ja tuotteita, sekä prosessien älykkyyttä lisäämällä. Erityisesti se voi auttaa korvaamaan rajallisiksi ja ongelmallisiksi tiedettyjä fossiilisia polttoaineita uusien energiaa säästävien ratkaisujen ja energiantuotannon menetelmien avulla.

Nanopartikkeleita on ehdotettu käytettäväksi ympäristön monitorointiin ja diagnosointiin sekä saasteiden puhdistamiseen ympäristöstä. Nanopartikkeleista itsestään voi kuitenkin muodostua biologisesti hajoamattomina pysyviä ympäristösaasteita. Nanomateriaalit voivat pinta-aktiivisina aineina esimerkiksi adsorboida kadmiumia ja muita ympäristömyrkyjä ja levittää niitä nopeasti mm. pohjavesiin. Nanopartikkeleiden vaikutuksia maaperään, vesistöihin, ilmastoon ja kerääntymistä eliöihin ei juuri tunneta. Altistumisen vaikutuksista ei ole tutkimustietoa, mikä vaikeuttaa mahdollisten ympäristöriskien luotettavaa arviointia.

Yhdysvaltain ja EU:n nanoteknologiaohjelmissa sekä EU:n tutkimuksen 7. puiteohjelmassa pidetään välttämättömänä ja osoitetaan voimavaroja nanoteknologian ympäristövaikutusten tutkimiseen sekä kansainvälisten ympäristönormien ja standardien säätämiseen. EU:n jäsenmaita aktivoidaan ympäristövaikutusten tutkimiseksi ja mahdollisten haittavaikutusten eliminoimiseksi. Ohjelmissa korostetaan avoimen vuoropuhelun tarvetta nanoteknologian mahdollisista haittavaikutuksista kansalaisten kanssa.

Suomi voi nousta oikein fokusoimalla merkittäväksi tekijäksi joillakin nanoteknologian ympäristövaikutusten aloilla tutkimuksessa, tiedon ja osaamisen välittämisessä sekä uuden teknologian kehittämisessä kaupallisiin tarkoituksiin.

3.3 Nanoteknologian yhteiskunnalliset ja sosiaaliset vaikutukset

Uudet teknologia- ja tuotantoprosessit edellyttävät yrityksiltä, yliopistoilta, tutkimuslaitoksilta ja kansalaisilta uusia toimintatapoja, poikkitieteellistä ja -teknologista yhteistyötä ja vuoropuhelua, uudenlaisia keskittymiä, klustereita ja verkostoja. Yhteiskunnan, yritysten ja organisaatioiden uudistumiskyky – sosiaaliset innovaatiot – vaikuttavat ratkaisevasti niiden elinvoimaisuuteen¹⁷. Nanoteknologia on mahdollistava teknologia ja sitä voidaan hyödyntää tehokkaasti vain, jos siihen on alusta asti valmiudet koko yhteiskunnassa.

Nanoteknologiaan liittyy sosiaalisia ja yhteiskunnallisia kysymyksiä: 1) Nanoteknologian mahdolliset ympäristö-, terveys- ja turvallisuusriskit sekä niiden aiheuttamat pelot; 2) Nanoteknologian valvonta; 3) Perinteisten tuotantoteknologioiden korvaaminen uusilla teknologioilla ja niiden sosiaaliset ja yhteiskunnalliset vaikutukset; 4) Uusien teknologioiden organisatoriset vaikutukset; 5) Uusien teknologioiden globaalit ja alueelliset vaikutukset; 6) Nanoteknologian vaikutukset koulutustarpeisiin; sekä 7) Nanoteknologian mielikuva ja hyväksyttävyys.

Nanoteknologian ympäristö-, terveys- ja turvallisuusriskien hallinta ja kansalaisten luottamuksen voittaminen sitä kautta on saavutettavissa panostamalla ympäristö-, terveys- ja turvallisuusriskien perustutkimukseen ja testien kehittämiseen, kansainvälisten standardien ja normien säätämiseen sekä avoimeen vuoropuheluun kansalaisten kanssa.

¹⁷ Hämäläinen T. J., Heiskala R. (2004). Sosiaaliset innovaatiot ja yhteiskunnan uudistumiskyky. Edita. Helsinki.

Nanoteknologian eettiset ulottuvuudet liittyvät mm. sodankäyntiin ja terrorismiin. Uhkien torjuminen edellyttää kansainvälisten sopimusten tekemistä ja kansainvälistä yhteistyötä. Eettiset vaikutukset ulottuvat myös valvontalaitteisiin, sovellusten valvontaan ja itse teknologian kehittämisen valvontaan.

Perinteisten tuotantoteknologioiden ennustetaan korvautuvan uusilla teknologioilla lähivuosina hitaasti, mutta pitkällä aikavälillä – siirryttäessä miniatyrisointiin perustuvasta teollisuudesta rakenteiden kasvattamisteknologiaan perustuvaan teollisuuteen – muutoksen uskotaan olevan dramaattinen. Se voi mahdollistaa mm. massamittaisen tavaratuotannon alhaisin kustannuksin. Uudet tuotantoteknologiat ja tuotannon keskittyminen muuttavat sosiaalisia suhteita ja arvoja vääjäämättömästi ja peruuttamattomasti. Kansalaisissa nämä voivat aiheuttaa mm. voimattomuuden tunnetta ja poliittista epävarmuutta.¹⁸

On nähtävissä, että nanoteknologian tutkimus, teknologiansiirto ja yritystoiminta edellyttävät kalliita aineellisia ja henkisiä investointeja, joihin yrityksillä, yliopistoilla ja tutkimuslaitoksilla ei yksin ole varaa. Osaamiskeskittymät ja yritystoiminta syntyvät sinne, missä on riittävästi innovaatioita, osaamista ja pääomia. Globaali talous muuttuu nopeasti ja muutokset ovat usein dramaattisia. Tämä saattaa kasvattaa eriarvoisuutta ja uudenlaisia yhteiskunnallisia ristiriitoja sekä pelkoja.

Nanotiede edellyttää mm. fysiikan, kemian sekä biologian tutkimustiedon ja tutkimusmenetelmien synteisiä. Näin syntyvät uudet nanoteknologiat on kytkettävä mikro- ja makroteknologioihin, tuotantoprosesseihin ja viime kädessä markkinoihin. Nanoteknologioiden pitkä tuotantoketju laboratorioista väli- ja lopputuotteiden kautta kaupallisille markkinoille edellyttää jokaisessa vaiheessa uudenlaista tiedollista ja teknologista osaamista. Uusi ymmärrys on kytkettävä aiemmin syntyneeseen osaamiseen. Muutokset tuotantoprosesseissa ja markkinatilanteessa edellyttävät organisatorisia muutoksia ja uusia toimintatapoja. Nämä vaativat uudenlaisia kvalifikaatioita nanotieteen tutkijoilta, teknologian asiantuntijoilta ja soveltajilta sekä kaikilta tuotantoketjussa olevilta. Koulutustarve ylittää kouluista ammatillisiin oppilaitoksiin, korkeakouluihin ja yliopistoihin, ja se koskee myös yritysten työvoimaa.

Yritysten ja sijoittajien kannalta uusiin teknologioihin liittyy aina vaikeasti ennustettavia ihmisten ja markkinoiden käyttäytymisestä johtuvia riskitekijöitä¹⁹. Ihmisten käyttäytyminen voi jäädyttää markkinat, kuten kävi mm. ydinvoimateknologiassa ja eräillä bioteknologian alueilla. Uusiin teknologioihin liittyvät sosiaaliset ja kulttuuriset tekijät vaikuttavat ratkaisevasti siihen, mitkä tuotteet ja missä muodossa päätyvät markkinoille. Lopputuotteiden hyväksyttävyys ja kysyntä on otettava huomioon jo uusien tuotteiden ja tuotantoprosessien suunnittelu- ja syntyvaiheessa. Tämä vuorostaan korostaa teknologioihin liittyvien sosiaalisten ja yhteiskunnallisten vaikutusten tutkimisen, asennebarometrien sekä kansalaisten kanssa käytävän avoimen vuoropuhelun merkitystä jo uusien teknologioiden syntyvaiheessa.

¹⁸ Arnall, A. H. (2003). *Future Technologies, Today's Choices*. Imperial College London. Michelson, E. (2004). Fogelberg, H. (2001). 'Science' and 'Technology' as Knowledge Cultures, esitelmä seminaarissa "The Battle at the Bottom: Making the Most of Feynman's Legacy". Michelson, E. (2004).

¹⁹ Analyzing the European Approach to Nanotechnology. Wynne, B. (1983) Redefining the issues of risk and public acceptance. The social viability of technology. *Futures. Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, NSF March 2001.

Suomessa tiedostetaan uusien teknologioiden yhteiskunnalliset ja sosiaaliset ulottuvuudet ja alan tutkimuksia on julkaistu runsaasti²⁰. Teknologioiden yhteiskunnallisten ja sosiaalisten vaikutusten tutkiminen Suomessa on tärkeää, koska teknologioiden yhteiskunnalliset vaikutukset riippuvat sosiaalisesta ja kulttuurisesta kontekstista. Teknologiset innovaatiot voidaan hyödyntää täysimääräisesti vasta sosiaalisen ja yhteiskunnallisen kypsymissvaiheen, sosiaalisten innovaatioiden kautta. Tutkimustieto avaa tietä välttämättömille sosiaalisille innovaatioille. Tutkimustiedolla voidaan hälventää uusiin teknologioihin liittyviä aiheettomia pelkoja.

²⁰ Tutkimushankkeita ovat rahoittaneet mm. Sitra (Kansallisen innovaatiojärjestelmän tutkimusohjelma, tutkimushanke Sosiaaliset innovaatiot, yhteiskunnan uudistumiskyky ja taloudellinen menestys; kohti oppivaa yhteiskuntaa), kauppa- ja teollisuusministeriö ja Teollisuuden voima (Ydinjätteiden loppusijoittaminen).

4 Nanotieteen ja nanoteknologian tutkimus ja koulutus Suomessa

Kansainvälisesti vahvat nanotieteen tutkimusalat Suomessa

Globalisoituvissa yhteiskunnissa on etsitty objektiivisia mittareita tieteen ja teknologian tutkimuksen tason ja vaikuttavuuden arviointiin monista syistä. Arviointi on hankalaa etenkin varhaisessa vaiheessa olevan uuden ja käänteentekeväen tutkimuksen osalta. Julkaisufoorumi-na käytettyjen lehtien luokittelu vaikuttavuusindeksin (impact factor) mukaan on yksi käytetyimmistä menetelmistä. Vaikuttavuusindeksi mittaa keskimääräisesti lehdessä julkaistujen artikkelien sitaatioiden määrää. Sillä on yritetty vertailla jopa yliopistojen tasoa ja asettaa niitä järjestykseen. Tunnetuin tällainen vertailu lienee ns. Shanghain lista. Tämän mittarin mukaan kiistattomia monitieteisiä huippulehtiä ovat esim. Science ja Nature. Suomen nanoteknologiassa Science- ja Nature-lehtiin (mukaan lukien Nature Materials) ovat yltäneet TKK:n teknillinen fysiikka ja HY:n fysiikka (itsejärjestäytyneet materiaalit), TKK:n kylmälaboratorio (kvanttielektroniikka), HY:n epäorgaaninen kemia ja Kiihdytinlaboratorio (ohutkalvoprosessit), Jyväskylän NanoScience Center (mesoskooppiset fermionisysteemit systeemit ja pintatiede), VTT:n biotekniikka (nanobioteknologia), VTT:n informaatioteknologia (kvanttielektroniikka) sekä nanotieteeseen liittyviltä alueilta Helsingin yliopiston Kiihdytinlaboratorio (fysiikka), biotiede (virologia) ja fysikaalisten tieteiden laitos (aerosolitutkimus). Näiden lisäksi julkaistaan eri alojen erityislehdissä laajaa, hyvätasoista ja tärkeää tutkimusta, joka on kansainvälisesti tunnustettua.

Toisaalta tutkimuksen toivotaan tuottavan entistä enemmän teknologiaa ja teollisuutta. Siksi tutkimusrahoitusta halutaan kohdentaa tuottavasti. Tällöin tarvitaan muita mittareita, erityisesti kykyä luoda maamme olosuhteissa liiketoiminnallisesti hyödynnettävää teknologiaa niin nykyisissä yrityksissä kuin uusien yritysten muodossa. Tässä VTT:lla on tärkeä asema, mutta yritysysteistyö ja spin off -yritysten luominen ovat enenevässä määrin tulleet mukaan myös yliopistojen toimintaan. Nanoteknologiaan pohjautuvia tai sitä hyödyntäviä spin off -yrityksiä on jo perustettu mm. ohutkalvojen (HY), fotonikan (TKK, TTY, JoY), nanomateriaalien (JY) sekä diagnostiikan ja lääketieteellisten sovellusten alalta (TY, HY).

Tärkeä osa nanotieteen tutkimusta on oppia suunnittelemaan nanorakenteita ja niihin perustuvia toimintoja simulaatioiden ja teoreettisten tarkastelujen avulla. Nanotieteessä tai siihen liittyvillä aloilla teorioissa ja simulaatioissa on kansainvälistä mainetta saavuttanut TKK, Jyväskylän yliopisto, Helsingin yliopisto sekä nanotieteen rajapinnoilla Oulun yliopisto.

Mikroelektroniikan ja nanoelektroniikan välille on vaikea piirtää tarkkaa raja-aitaa, koska nykyinen puolijohdetekniikka yltää alle 100 nanometrin viivanleveyden. Pienen koon uuden-

laisia ominaisuuksia tuottava elektroniikka, kvanttielektroniikka, on tutkimuskohteena TKK:n kylmälaboratoriossa sekä VTT:n Tietotekniikassa Otaniemessä. Laboratoriot ovat kansainvälisesti tunnettuja. Uusia tulokkaita on esimerkiksi Jyväskylän yliopistossa ja nanoelektroniikan rajamaastossa Oulun VTT:ssa. Elektroniikkaan liittyy Suomessa oleellisesti vahva ohutkalvotekniikkaosaaminen. Helsingin yliopistossa on kansainvälisesti merkittävä osaamiskeskittymä epäorgaanisessa kemiassa. Alalla on vahvaa osaamista myös VTT:ssa ja TKK:ssa.

Optoelektroniikka ja aalto-optiikka, eli fotonikka, sisältää teknisesti pitkälle jalostettua mikro- ja nanoskaalan rakenteiden hallintaa, johon osittain nojaa maamme uusi teollisuus (laservalmistus). Nanofotonikan tutkimus on keskittynyt ORC:hen (Optical Research Center, Tampere), TTY:n kemian ja fysiikan laitoksiin, JoY:n fysiikan laitokseen ja Otaniemen Micronovaan. Niissä on tehty uraa uurtavaa työtä valon manipuloimiseksi nanorakenteilla. Manipulointiin käytetään kvanttikaivoja, kvanttipisteitä, epälineaarisia ilmiöitä aiheuttavia rakenteita (esim. kvanttimekaanisia peilejä), diffraktiivisia komponentteja, optisia lähikenttiä ja fotonikiteitä. Rakenteita valmistetaan molekyylisuihkuepitaksialla (molecular beam epitaxy, MBE), metallo-orgaanisella kaasufaasiepitaksialla (MOVPE), elektronisuihkulitografialla ja nanopainotekniikalla. OY:ssa on ionisuihkulitografia, jonka resoluutio on samaa suuruusluokkaa kuin elektronisuihkulitografian. VTT Tietotekniikka on nanopainotekniikan (nanoimprinting lithography) uranuurtaja Suomessa.

Elektroniikan ja nanomateriaalien rajamaastossa on hiilen nanoputkien ja fullereenien tutkimus, jossa TKK, Åbo Akademi ja Jyväskylän yliopisto ovat julkaisseet merkittäviä tutkimuksia, esimerkiksi nanoelektroniikasta, nanokomposiiteista ja nanomuisteista.

Kemia ei sellaisenaan ole nanoteknologiaa, mutta siirryttäessä kohti molekyyleistä konstruoitavia hallittavia uusia kokonaisuuksia ja muodostettaessa molekyylikoneita päädytään supramolekyylikemiaan. Siinä merkittävää ja arvostettua osaamista on Jyväskylän yliopiston kemian laitoksella ja lisäksi TKK:ssa teknillisen fysiikan osastolla ja kemian tekniikan osastolla sekä TTY:n fysikaalisessa kemiassa. Epälineaariseen optiikkaan liittyvää orgaanisten molekyylien osaamista on TTY:n fysiikan osastolla. Hyvää osaamista templaattien käyttöön nanomateriaalien valmistuksessa ja sähkökehräyksen (electrospinning) käyttöön nanokuitujen valmistuksessa on HY:n epäorgaanisen kemian ja TKK:n polymeerifysiikan laboratorioissa. Polymeerinanorakenteiden ja metallinanopartikkeleiden perus- ja soveltava tutkimus on vahvaa HY:n polymeerikemian ja TKK:n fysikaalisen kemian laboratorioissa.

Vaikka osaa nykyisestä biotieteen tutkimuksesta voidaan ehkä pitää nanotieteenä tai -teknologiana niiden poikkitieteellisten lähestymistapojen tai sovellusten kautta, on välttämätöntä pystyä erottamaan biotieteellisestä tutkimuksesta bionanotiede ja -teknologia, joka aidosti hyödyntää nanomittakaavan ominaisuuksia uudella tavalla. Biologiset molekyylit tuovat nanoteknologian sovelluksiin ainutlaatuisia ominaisuuksia, joista tällä hetkellä tutkituimpia sovellusten kannalta ovat itsejärjestyminen ja spesifinen tunnistus. Kansainvälistä huomiota saavuttanut bionanoteknologinen avaus on ollut molekyylien spesifinen puhdistaminen nanohuokoisten kalvojen avulla (VTT). Korkeatasoista sovelluksiin tähtäävää nanobiomateriaalitutkimusta tehdään useissa ryhmissä Suomessa. Biologisia komponentteja on yhdistetty mm. nanopartikkeleihin, sensoreihin ja antureihin (HY, TKK, VTT, TTY, TY). Bioalalla on lisäksi useita kansainvälisestikin merkittäviä tutkimusryhmiä, joiden biokemiallinen, molekyylibiologinen, virologinen ja solubiologinen osaaminen voi lähitulevaisuudessa johtaa uusiin nanoteknologisiin avauksiin.

Seuraavassa tarkastellaan Suomen nanotieteen ja nanoteknologian tutkimuskeskittymiä ja keihäänkärkiä seuraavien kriteereiden perusteella: 1) Tutkimus on aidosti monitieteistä nanotiedettä tai nanoteknologiaa; 2) Tutkimus on kansainvälisesti korkeinta tasoa (erikseen

mainitaan vain, mikäli on saavutettu julkaisuja korkeimman tason lehdissä eli pystytty luomaan aidosti uusia innovaatioita yli eri alojen perinteisemmän laajan ja hyvän tutkimuksen, huippuyksiköt, akatemiaprofessuurit, tiedepalkinnot; 3) Teknologia liiketoiminta on kehittynyttä (nanoteknologian sovellukset, yritysysteistyö, syntyneet uudet yritykset); 4) Kansainvälinen toiminta on kehittynyttä (mm. EU-hankkeet ja verkostot); 5) Tutkijan koulutus on aktiivista; sekä 6) Infrastruktuuri on monipuolinen ja korkeatasoinen.

4.1 Nanotieteen ja nanoteknologian tutkimus ja tutkimusympäristöt Suomessa

Nanotieteen ja nanoteknologian t&k-toiminta on tällä hetkellä keskittynyt Suomessa pitkälle 1) pääkaupunkiseudulle, jossa Teknillinen korkeakoulu (TKK), Valtion teknillinen tutkimuslaitos (VTT) ja Helsingin yliopisto (HY) kehittävät yhteistyötään Helsinki-Nano -konsortiossa, 2) Jyväskylän yliopiston (JY) monitieteiseen NanoScience Centeriin sekä 3) Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) johtamaan (TTY, JoY) nanofotoniikan konsortioon, johon alihankkijana kuuluu myös Oulun yliopiston (OY) ionisuihkulitografiyksikkö.

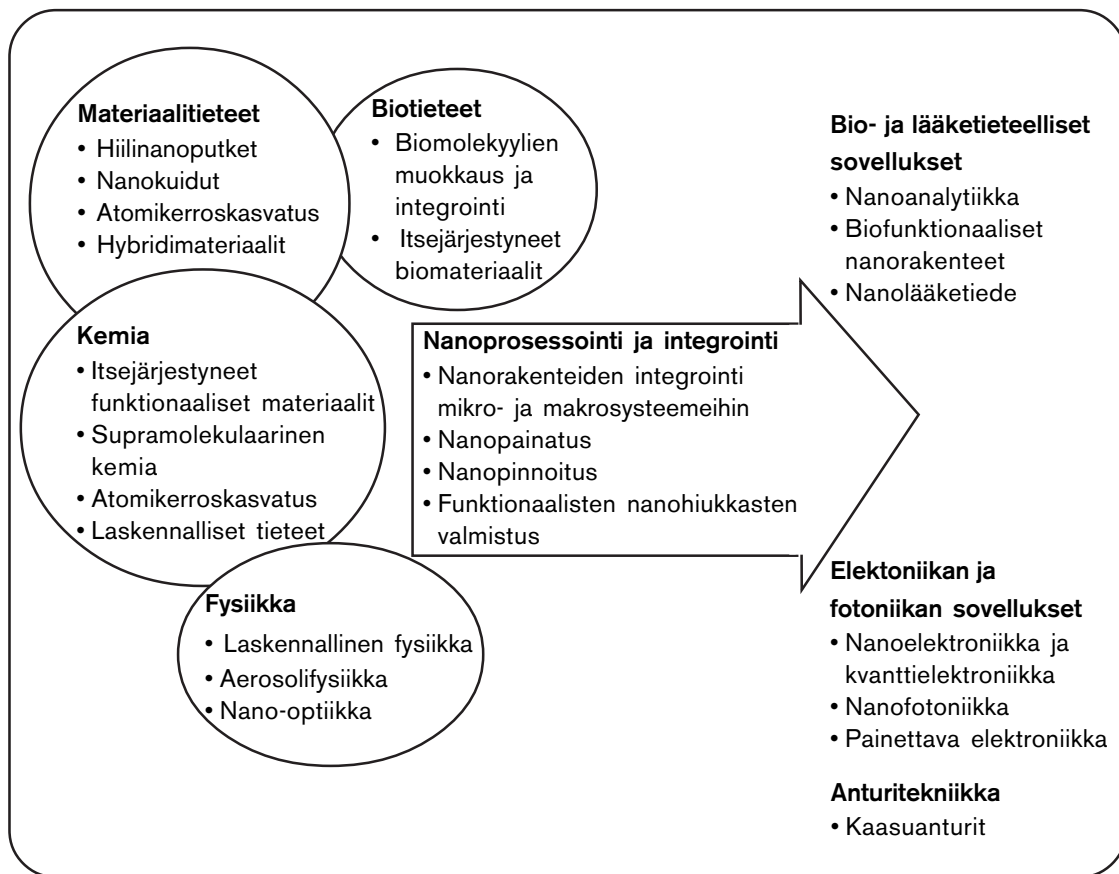
Nanotieteeseen ja nanoteknologiaan liittyvää korkeatasoista tutkimusta tehdään myös muualla Suomessa. Seuraavassa tarkastellaan yksiköiden omien esitysten perusteella ensin jo syntyneitä ja syntymässä olevia nanotieteen ja -tekniologian osaamiskeskittymiä ja sen jälkeen lyhyesti muualla tehtävää nanotieteeseen ja -tekniologiaan liittyvää korkeatasoista tutkimusta.

4.1.1 Helsinki-Nano – pääkaupunkiseudun nanotieteen ja -tekniologian keskittymä

Helsingin yliopisto, Teknillinen korkeakoulu ja VTT:n Otaniemen yksiköt muodostavat poikkitieteellisen nanotieteen ja nanotekniologian alueellisen keskittymän *Helsinki-Nanon*, yhdistäen Otaniemen teknologiakampuksen, Viikin biokampuksen, Kumpulan kemian ja fysiikan kampuksen, ja Meilahden lääketiedekampuksen toimintoja. Näillä neljällä kampuksella nanotiedettä ja nanotekniologiaa tutkitaan yli 30 laboratoriossa 300 tutkijan voimin: Alalla on mm. 6 akatemiaprofessoria ja 5 Suomen Akatemian huippututkimusyksikköä: bio- ja nanopolymeerien (TKK-HY-TY), virologian (HY), laskennallisen molekyyli tutkimuksen (HY), laskennallisen nanotieteen (TKK) sekä matalien lämpötilojen kvantti-ilmiöiden ja komponenttien (TKK ja VTT) huippuyksiköt. HY, TKK, VTT (Otaniemi) koordinoivat kuutta Tekesin FinNano-teknologiaohjelman viidestätoista tutkimushankkeesta.

a) Tutkimuksen profiili ja keihäänkärjet

Vuonna 2003 käynnistynyt *Helsinki-Nano*-hanke on tiivistänyt nanotekniologian alueellista yhteistyötä ennen kaikkea Helsingin yliopiston, Teknillisen korkeakoulun ja VTT:n välillä. Hankkeessa lisätään tutkimuksen moni- ja poikkitieteellisyttä yhdistämällä systemaattisesti eri tieteenaloja, esimerkiksi kemiaa, fysiikkaa, biokemiaa, elektroniikkaa, fotonikkaa, materiaalitieteitä ja laskennallisia tieteitä (kuva 1).



Kuva 1. Helsinki-Nano: nanotieteestä nanoteknologiaa mikroteknologian keinoin.

Tästä laajasta tutkimuskentästä on poimittu erityiset keihäänkärkialueet, joita *yhdistää nanotieteen ja nanoteknologian käyttäminen toiminnallisten materiaalien ja systeemien aikaansaamiseksi ja eri kampusalueiden vahvuuksien yhdistäminen:*

1. Nanoelektronikka ja -fotonikka

Nanoelektronikan ja -fotonikan keihäänkärkialueella nanotiede jalostetaan nanoteknologiaksi integroimalla nanomaailman ilmiöt toiminnalliseksi osaksi makromaailman komponentteja ja laitteita. Keihäänkärki kokoa koulutuksen, tutkimuksen ja sovellukset nanoteknologian arvoketjuksi. Keihäänkärjellä on toimintaa Otaniemen kampuksella TKK:n ja VTT:n yhteisessä nano- ja mikroteknologian keskuksessa Micronovassa ja HY:n Kumpulan kampuksella Kiihdytinlaboratoriossa. Pohjoismaiden suurimman (2 600 m²) puhdistilan sisältävässä Micronovassa on henkilökuntaa noin 300, josta nanotekniikkaa soveltaa arviolta 70 tutkijaa. Micronovan kokonaisinvestoinnit ovat 90 miljoonaa euroa ja sinne on sijoittunut myös tuotekehitysryhmiä seitsemästä yrityksestä, joista nanoteknologian yrityksinä voidaan mainita mm. Beneq, Picosun, Nanoway, OptoGaN ja Silecs.

Keihäänkärkialueen ytimeen kuuluu 1 HY:n, 5 TKK:n ja 2 VTT:n tutkimusryhmää, jotka toimivat yli organisaatiorajojen. Ryhmien yhteenlaskettu tutkijamäärä on yli 60 ja nanotutkimuksen vuosibudjetti noin 5 miljoonaa euroa. Keihäänkärkialueen yhteistoiminta kohdennetaan perustutkimukseen, valmistusmenetelmien kehittämiseen sekä nanoteknologian sovelluksiin. Perustutkimuskohteina ovat nanorakenteiden, -komponenttien ja -piirien ominaisuudet ja ominaisuuksien räätälöinti, kvantti-ilmiöt jopa yhden elektronin, fotonin ja fononin komponenteissa, spintroniikka sekä lokalisoitujen valokenttien ja nanorakenteiden väliset vuorovaikutusilmiöt.

Valmistusmenetelmien kehitystyössä esillä ovat sekä "top-down" - että "bottom-up" -ratkaisut. Esimerkkeinä edellisistä ovat kehittyneet nanolitografiamenetelmät, kuten ionisuihkutyöstö sekä elektroniikan painatusmenetelmät, ja jälkimmäisistä optiset ja mekaaniset nanomanipulaatiomenetelmät sekä itseorganisoituva nanorakenteiden kasvatus.

Sovelluskohteita ovat herkäät bioanturit ja kemian anturit lääketieteen diagnostiikkaan ja ympäristön monitorointiin, sähkömagneettiset (dc-THz) ilmaisimet ja mikrojäähdyttimet astrofysiikan, materiaalitutkimuksen, lääketieteellisen kuvantamisen ja kulunvalvonnan tarpeisiin sekä nanorakenteisiin perustuvat fotonikkakomponentit, kuten fotonikiteet ja fotonikidekuidut sekä kvanttielektroniikan ja -optiikan komponentit metrologiaan, kvanttilaskentaan ja kryptografiaan. Teollisuuskumppaneina sovelluksissa ovat jo mukana mm. ABR Innova, Beneq, Coherent Finland, Heptagon, KSV Instruments, Liekki, Nokia, OptoGaN ja Oxford Instruments Analytical.

Perustelu keihäänkärkiasemalle: Keihäänkärkialueen ryhmät ovat osallistuneet ja osallistuvat yhdeksään EU-hankkeeseen ja koordinoivat kahta EU:n tutkimuksen 6. puiteohjelman nanohanketta, joista IP-hankkeen Emerging Nanopatterning Technologies (NaPa) kokonaisbudjetti on 31 miljoonaa euroa. Alueen ryhmät ovat julkaisseet nanotutkimuksia mm. seuraavissa julkaisuissa: *Reviews of Modern Physics*, *Science*, *Nature*, *Nature Materials* ja *Physical Review Letters*. Keihäänkärkialueeseen kuuluu myös TKK:n ja VTT:n yhteinen Suomen Akatemian Matalien lämpötilojen kvantti-ilmiöiden ja komponenttien huippuyksikkö.

2. Ohutkalvotutkimus

Helsingin alueella ohutkalvotutkimusta tehdään laajasti tavoitteena uudet toiminnot. Laajin panostus on Kumpulan kampuksella, jossa tehdään maailman huipputasoa olevaa ohutkalvoja ja nanohiukkastutkimusta. Nanometriluokkaa olevia ohutkalvoja valmistetaan kampuksella monilla menetelmillä, joista atomikerroskasvatus (Atomic Layer Deposition, ALD) ja Kiihdytinlaboration ionisuihkumenetelmät ovat merkittävimmät. ALD-menetelmä kehitettiin alun perin Suomessa, ja sen edelleen kehittämisessä on kampuksen tutkimusryhmillä maailmanlaajuisesti johtava rooli, jota osoittaa mm. se, että kansainvälisen yhtiön ASM International N.V.:n tytäryhtiö ASM Microchemistry Oy sijaitsee Kemian laitoksella Kumpulassa. ALD-menetelmää sovelletaan uudentyyppisten nanomateriaalien valmistukseen mm. valmistamalla monikerrosrakenteita eli nanolaminaatteja, nanokuvioituja pintoja itsejärjestyvien molekyylikerrosten avulla ja nanokuituja ja -putkia templaattien avulla, joita ovat esim. huokoinen alumiinioksidi ja pii tai erilaiset kuidut. Ohutkalvot mahdollistavat nanoteknologiaa ja uusia toimintoja, kun ne yhdistetään muihin rakenteisiin.

Otaniemen kampuksella ALD-tekniikkaa ja muita kalvonkasvatustekniikoita käytetään sekä nanokerrosrakenteiden valmistuksessa ja karakterisoinnissa että katalyyttien valmistuksessa. Tekesin FinNano-teknologiaohjelmassa on Otaniemen koordinoimana aloitettu kaksi hanketta, jossa ALD-menetelmä on avainasemassa. Samoin ALD-menetelmällä tutkitaan kasvatettujen oksidipinnoitteiden käyttöä 3-ulotteisten MEMS-komponenttien valmistuksessa. Tavoitteena on helpottaa erilaisten RF-komponenttien, antureiden ja ilmaisimien valmistettavuutta ja parantaa niiden luotettavuutta. Otaniemen ja Kumpulan kampusten välillä on useita yhteisiä Suomen Akatemian ja Tekesin rahoittamia projekteja, jossa ALD- ja muilla ohutkalvotekniikoilla on keskeinen rooli.

Perustelu keihäänkärkiasemalle: Keihäänkärkialueen ryhmät osallistuvat yhteen EU:n tutkimuksen 6. puiteohjelman nanohankkeeseen. Alueen ryhmät ovat julkaisseet nanotutkimuksiaan mm. seuraavissa huippulehdissä: *Science*, *Nature*, *Angewandte Chemie International*, *Journal of the American Chemical Society*. Keihäänkärkialueeseen kuuluu myös TKK:n ja HY:n

yhteinen Suomen Akatemian huippututkimusyksikkö (Bio- ja nanopolymeerien tutkimusryhmä osin) ja akatemiaprofessori.

3. Integroidut bionanosysteemit

Eri tavoin aktiiviset biokomponentit (proteiinit, DNA ja lipidit) sekä suuremmat biologiset kokonaisuudet (proteiinikompleksit ja virukset) voidaan bio- ja nanotekniikan menetelmiä soveltaen liittää osaksi ei-biologisia komponentteja sekä siru- ja anturirakenteita. Biomolekyyliä hyödyntäviä tieteenaloja ovat esim. elektroniikka, mikro- ja nanofluidistiikka sekä materiaalitiede. Helsinki-Nano tarjoaa hyvän lähtökohdan biotieteiden yhdistämiselle muihin tekniikoihin yhdistämällä Viikin, Kumpulan, Otaniemen ja Meilahden kampusten ja Micronovan toimintoja.

Merkittävää kansainvälistä huomiota on jo saanut biomimeettisen itsejärjestymisen soveltaminen synteettisten ja biosynteettisten hybridien tuottamiseen, jolloin aikaansaadaan esim. ulkoisesti ohjattavia sähköisiä ja optisia ominaisuuksia, sekä biomolekyylien erottaminen spesifisten bionanokalvojen avulla.

Biomolekyylien yhdistäminen poikkitieteellisesti muihin materiaaleihin tai systeemeihin on avannut uusia bionanotieteen mahdollisuuksia. Sovellusten kannalta tärkeitä ilmiöitä ovat itsejärjestäytyminen, katalyysi ja spesifinen molekyylitunnistus. Sovellusalueita ovat mm. bionanokalvot, -partikkelit, -pinnoitteet, -rakenteet, -anturit- ja -elektroniset komponentit. Biomolekyylien rakenteen ja siitä johtuvan toiminnan välinen yhteys ja sen hallittu muokkaaminen molekyylibiologisin keinoin mahdollistaa uudenlaisten bionanokomponenttien valmistamisen.

Helsinki-Nanoon kuuluu useita korkeatasoisia ryhmiä, joissa tutkitaan biomolekyylien sopivuutta nanoteknologiaan sovelluksiin tai kehitetään nanobioteknologiaa hyödyntäviä systeemejä, esimerkkeinä kompleksisen viruspartikkelin hallittu kokoaminen *in vitro* sen puhdistetuista proteiini- ja nukleiinihappo-osasista ja sen integroiminen sirulle, energiaa muuntavien proteiineista koostuvien nanokoneiden toimintamekanismin ja sovellusmahdollisuuksien tutkiminen systeemin osana, sekä luonnollisten ja muokattujen proteiinien sekä lipidien ja nukleiinihappojen spontaanin itsejärjestymisen tutkiminen nanoteknologian sovelluksiin. Lupaavia tuloksia on saatu valoakeräävien bakteeriperäisten nanorakenteiden liittämässä fotodetektorin aktiiviseksi osaksi sekä itseorganisoituvilla biofunktionaalisilla nanopartikkeleilla.

Perustelu keihäänkärkiasemalle: Keihäänkärkialueen ryhmät osallistuvat yhteen EU:n tutkimuksen 6. puiteohjelman nanohankeeseen. Alueen ryhmät ovat julkaisseet nanotutkimuksiaan mm. seuraavissa huippulehdissä: *Nature*, *Science*, *Cell*, *Molecular Cell*, *Nature Structural and Molecular Biology*, *Nature Materials*, ja *Advanced Materials*. Keihäänkärkialueeseen kuuluu kaksi Suomen Akatemian huippututkimusyksikköä (Virologian huippuyksikkö ja Bio- ja nanopolymeerien huippuyksikkö osin) ja kaksi akatemiaprofessoria.

4. Nanohiukkaset ja nanoputket

Otaniemen, Kumpulan ja Viikin kampuksilla tehtävä nanohiukkastutkimus on saanut laajaa huomiota. Eri kampuksilla valmistetaan ja tutkitaan monialaisesti mm. metallinanohiukkas-ia. Kultananohiukkasilla on yllättäviä ominaisuuksia, jotka tarjoavat mahdollisuuksia uudenlaisiin elektroniikan ja neuraalisen verkoston systeemeihin ja ympäristön olosuhteisiin reagoiviin nanohiukkasiin ja ohutkalvoihin. Magneettiset kobolttinanohiukkaset tarjoavat uusia mahdollisuuksia funktionaaliin materiaaleihin. Kampuksilla kehitetään myös uudenlaista

katalyyssia, jossa katalyytit on immobilisoitu metallisten nanohiukkasten pinnalle, räätälöidään polymeerimateriaalien rakenteita nanotasolla, ja käytetään hyväksi molekyylien itsejärjestymistä. Näiden ilmiöiden on osoitettu tarjoavan uusia käänteentekeviä mahdollisuuksia synteesikemialle ja teollisille prosesseille. On myös kehitetty uusi, aerosolireaktoriteknikkaan perustuva tapa tuottaa toiminnallisia lääkeaine-polymeerinanohiukkasia lääkkeiden hallittuun annosteluun. Lisäksi optisesti aktiivisia puolijohdenanohiukkasia valmistetaan stabiiliin piidioksidikerroksen sisään ioni-istutuksella sekä käyttäen molekyyliisuihkuepitaksiaa. Nanokiteisiä ohutkalvoja valmistetaan tähän tarkoitukseen rakennetulla erityisellä ionisuihkulaitteistolla. Sekä orgaanisten että epäorgaanisten nanohiukkasten kasvumekanismien ymmärtämistä haetaan aerosolihiukkasten kasvun havainnointilaitteistoilla ja teoreettisesti samojen ilmiöiden laskennallisen tutkimuksen avulla.

Helsinki-Nanon yksiköissä tutkitaan laajasti hiilen nanorakenteita. Yksiseinäisten hiilinanoputkien jatkuvatoimiseen valmistukseen on kehitetty aerosolireaktoriteknikkaan perustuva menetelmä, jossa paremmin kuin missään muussa tiedossa olevassa menetelmässä voidaan säätää putken sähköisiä ja optisia ominaisuuksia. Menetelmällä on onnistuttu tuottamaan myös uusi hiilen nanomateriaali, jossa fullereenimolekyylit kiinnitetään kemiallisella sidoksella yksiseinäiseen hiilen nanoputkeen. Yhtenä sovelluskohteena tutkitaan hiilen nanopalloihin perustuvia muisteja. Nanoputkiin perustuen kehitetään hiileen perustuvia uusia komposiittimateriaaleja mm. elektroniikan, mekaanisiin, diagnostiikan ja energiatekniikan sovelluksiin. Kampusten välisenä yhteistyönä kehitetään toiminnallisia selluloosan nanokuituja. Otaniemen kampuksella Micronovassa valmistetaan myös itsejärjestyneitä puolijohdekvanttipisteitä ja -lankoja käyttäen MOVPE-menetelmää. Kvanttilankojen valmistus tapahtuu kultananopartikkelien avulla. Tähän liittyen on mm. kehitetty uudentyypiset kvanttipiste- ja kvanttirengasrakenteet. Näiden nanorakenteiden hallittu valmistus puolijohdematriisiin sekä räätälöinti mahdollistavat kvantti-ilmiöiden tutkimisen optisen spektroskopian sekä mallinnuksen avulla.

Perustelu keihäänkärkialueelle: Keihäänkärkialueen ryhmät osallistuvat neljään EU:n tutkimuksen 6. puiteohjelman nanohankkeeseen ja koordinoivat niistä yhtä. Alueen ryhmät ovat julkaisseet nanotutkimuksiaan mm seuraavissa huippulehdissä: *Physical Review Letters*, *Nano Letters*. Keihäänkärkialueeseen liittyvää tutkimus sivuaa yhtä Suomen Akatemian huippututkimusyksikköä (Bio- ja nanopolymeerit pieneltä osin). Lisäksi on perustettu yksi uusi high tech -yritys.

5. Teoreettinen ja laskennallinen tutkimus

Teoreettinen ja laskennallinen tutkimus on yksi nanotieteen ja -teknologian kivijaloista. Nanomittakaavan rakenteiden ja ilmiöiden kompleksisuus edellyttää luotettaviin ennusteisiin kykenevien teoreettisten menetelmien kehittämistä ja käyttöä. Nanoskaalan materiaalisynteesi sekä kokeellinen karakterisointi vaativat myös korkeatasoista teoriaa oikeiden tulkintojen varmistamiseksi. Laskennallisella nanotieteellä on Suomessa vahva traditio ja kansainvälisesti tunnustettu asema. Teknillisessä korkeakoulussa toimiva Laskennallisen nanotieteen huippuyksikkö on kehittänyt ja soveltanut monipuolisesti laskennallisia menetelmiä mm. nanorakenteiden elektronisten ja optisten ominaisuuksien ennustamiseen, pinta- ja rajapintailmiöiden mallintamiseen, kvantti- ja monihiukkasilmiöihin nanokomponenteissa sekä nanomittakaavan biologiseen fysiikkaan. Helsingin yliopistossa toimiva Laskennallisen molekyyli­tutkimuksen huippuyksikkö lähestyy nanotutkimusta toisaalta kiinteän aineen fysiikan ja toisaalta molekyyli­mallinnuksen kautta. Yksikössä on mm. määritetty teoreettinen pohja sille, miten nanoputkien ominaisuuksia voi muuntaa hallitusti säteilytyksellä, ja ennustettu uusien

metallipohjaisten fullereenien olemassaolo. Laskennallisen nanotieteen huippuyksikkö ja Laskennallisen molekyyli­tutkimuksen huippuyksikkö tekevät läheistä yhteistyötä mm. nanoputkien ominaisuuksien tutkimuksessa. Näissä huippuyksiköissä on SCI-tietokannan mukaan eräät siteeratuimmista kemian ja fysikaalisten tieteiden tutkijoista Suomessa. Laskennallisen nanotieteen huippuyksikön työ on heijastunut muihin alan tutkimusryhmiin Suomessa, mm. Oulun ja Turun yliopistoissa sekä Tampereen teknillisessä yliopistossa ja Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa. Laskennallinen nanotiede vaatii ajanmukaisen infrastruktuurin, johon kuuluvat tehokkaat tietokonelaitteistot, ohjelmistot sekä visualisointivälineet.

Perustelu keihäänkärkiasemalle: Keihäänkärkialueen ryhmät osallistuvat viiteen EU:n tutkimuksen 6. puiteohjelman nanohankkeeseen. Alueen ryhmät ovat julkaisseet nanotutkimuksiaan mm. seuraavissa huippulehdissä: *Nature*, *Angewandte Chemie International*, *Physical Review Letters*. Keihäänkärkialueeseen kuuluvat Suomen Akatemian Laskennallisen nanotieteen huippuyksikkö ja Laskennallisen molekyyli­tutkimuksen huippuyksikkö ja akatemiaprofessori.

Puhtaasti nanotieteen julkaisuja edellä mainituilla keihäänkärkialoilla on 2000–2005 huippulehdissä (IF yli 7) n. 100. Nanotieteen kaikkien julkaisujen määrä kyseisenä aikana on niin suuri, että siitä ei ole helppo esittää luotettavaa lukua (tuhansia). Sen lisäksi nanotieteen nyt liitettävillä biologisilla tieteillä on useita kymmeniä julkaisuja huippulehdissä (esim. *Nature* ja sen tytärlahdet, *EMBO Journal*, *Molecular Cell*) ja kaikkien julkaisujen lukumäärä on suuri.

b) Infrastruktuuri

Kampuksilla on olemassa nanoteknologian kannalta oleellista infrastruktuuria Otaniemen, Kumpulan, Viikin, ja Meilahden kampuksilla, mutta merkittävät lisäpanostukset ovat välttämättömät kansainvälisen kilpailun kiristyessä.

Micronova on VTT:n ja TKK:n yhteinen, 2 600 m² puhdastilaa sisältävä vuonna 2002 valmistunut kansallinen mikro- ja nanotekniikan keskus. Keskuksessa on Suomen parhaat puhdastilat ja mittava prosessointilaitteisto puolijohteille, metallirakenteille ja polymeereille. Kokonaisinvestoinnit ovat noin 90 miljoonaa euroa. Micronovassa toimii kahdeksan TKK:n ja HY:n ryhmää, VTT Tietotekniikan nanotutkimus sekä useiden nanoteknologiaa kehittävien yritysten tutkimusryhmät. Micronovassa nanotieteestä kehitetään nanoteknologiaa yhdistämällä monitieteisesti materiaalitutkimusta, optiikkaa, ftoniikkaa, kemiaa, biologiaa sekä mikroteknologian valmistusmenetelmiä. Tutkimusprofiilinsa ja infrastruktuurinsa ansiosta Micronova muodostaa maassamme ainutlaatuisen resurssin nanokomponenttien ja -laitteiden valmistukseen.

Uusien materiaalien keskus (UMK) on TKK:n 22 jäsenlaboratorion yhteistyöelin, ja nanoteknologia on yksi sen tärkeistä yhteistyöalueista. Vuonna 2007 valmistuvaan uuteen poikkitieteelliseen nanokeskukseen Nanopoliin siirtyy useita UMK:n jäsenlaboratorioita. Tällöin "top-down"- ja "bottom up"-tekniikoiden yhdistäminen tehostuu, samoin osaaminen synteettisistä elektroniikan nanotekniikoista aina ohjelmoitaviin bionanomateriaaleihin; samaan taloon siirtyy useita Suomen Akatemian huippututkimusryhmiä, joiden laitekantaa ja osaamista koordinoidaan yhteisesti. Vuonna 2007 valmistuu myös tasokas molekyylien ja atomien manipulointiin liittyvä nanomikroskopiakeskus. Se on suunniteltu erityisen häiriötömäksi, jolloin se mahdollistaa alle 0,1 nanometrin resoluution mikroskopiassa. Nanomikroskopiakeskuksesta TKK pyrkii muodostamaan kansallisen keskuksen, jotta kalliit erityislaitteet ja osaaminen voidaan kansallisesti parhaiten hyödyntää.

Opetusministeriön omistama kansallisesti toimiva ja Keilaniemessä sijaitseva **Tieteen tietotekniikan keskus** CSC on merkittävä nanotieteen tutkimuksen ja nanoteknologian

soveltamisen tietoteknisen infrastruktuurin ylläpitäjä. Laskennallisen nanotieteen tutkijat ovat rakentaneet kansallisen M-Grid-järjestelmän, jossa on mukana kuusi yliopistoa ja Tieteen tietotekniikan keskus CSC.

c) Voimavarat

Nanotiede ja -teknologia perustuvat monitieteelliseen yhteistyöhön, joka Helsingin alueella perustuu vahvaan tutkimuskeskittymään (HY, TKK ja VTT). Monitieteisestä, verkottuneesta lähestymistavasta johtuen monet tutkimusryhmät työskentelevät sekä nanotieteen että perinteisempien tutkimusalojen parissa. Viitteen toiminnan laajuudesta antaa Tekesin kansallinen FinNano-teknologiaohjelma, jossa HY:n, TKK:n ja Otaniemen/VTT:n osuus rahoituksesta on noin 40 %. Nanotutkijoita Helsingin alueen tutkimuslaitoksissa on lähes 300, joista TKK:ssa n. 150, VTT:ssa 30 ja HY:ssa 100. Nanoteknologian tutkimuksen rahoitus on vuositasolla noin 10 miljoonaa euroa. Tärkeimmät rahoittajat ovat Suomen Akatemia, Tekes, Euroopan unioni ja yritykset. Tutkimusrahoituksen lisäksi nanoteknologian kehittäminen edellyttää merkittäviä laite- ja osaamisinvestointeja erityisesti nanoskaalan valmistustekniikoihin ja kehittyneisiin analysointijärjestelmiin. Lisäksi nanotutkimus edellyttää infrastruktuuritukea suuren mittakaavan keskuksiin (Micronova ja nanomikroskopiakeskus).

d) Kansainvälinen yhteistyö

Helsinki-Nanon laboratoriot osallistuvat yli kymmeneen EU:n tutkimuksen 6. puiteohjelman hankkeeseen ja koordinoivat niistä kolmea. Lisäksi laboratoriot osallistuvat ESF:n (European Science Foundation) Functional Nanostructures -ohjelmaan ja kahteen Marie Curie -verkostoon nanotieteessä. EU-ohjelmien lisäksi tutkimusyhteistyötä on merkittävässä määrin myös yhdysvaltalaisen ja japanilaisten tutkimuslaitosten kanssa. Lähivuosina kansainvälisen yhteistyön odotetaan laajenevan merkittävästi.

e) Teknologiansiirto

Vuonna 2003 käynnistynyt Helsinki-Nano-hanke tiivistää nanoteknologian alueellista yhteistyötä. Hankkeella edesautetaan myös nanoteknologian hyödyntämistä yritystoiminnassa. Helsingissä toimivat kauppakorkeakoulut mahdollistavat kaupallisen koulutuksen yhdistämisen hankkeeseen ja taideteollisen korkeakoulun tuoteinnovaatioiden liittämisen teknologiseen osaamiseen.

Helsinki-Nano on löytänyt alueellisesti vahvoja tutkimusaloja, joita yhdistämällä ja vahvistamalla pyritään luomaan uusia poikkitieteellisiä aluevaltauksia. Tutkimuksessa tämä on jo kanavoitunut uusiksi hankkeiksi. Helsinki-Nanoa voidaan pitää merkittävänä nanoteknologian keskittymänä Pohjoismaissa Lund-Kööpenhamina-yhteistyön ohella. Alueella toimii maamme nanoteknologian uranuurtajayrityksiä sekä omaan nanoteknologiaan perustuvia uusia yrityksiä ja uutta liiketoimintaa. Visiona on lisätä Helsingin seudun tunnettavuutta nanoteknologialiiketoiminnan luojana sekä Suomen näkyvyyden ja houkuttelevuuden lisääjänä ulkomaalaisten huippuosaajien ja potentiaalisten yhteistyökumppaneiden suuntaan. Erityisenä vahvuutena Helsingin alueella on läheinen yhteistyö yritysten kanssa. Helsingin alueen nanoteknologiaa käyttäviä yrityksiä ovat Orion Diagnostica, Planar, Beneq, Picosun, ASM Microchemistry, Ani Biotech, Aspocomp, Avantone, Heptagon, Nokia, OptoGaN, Orion, Oxford Instruments Analytical, Perlos, Suunto ja UPM.

Pääkaupunkiseudulla syntynyt nanoteknologian erikoisosaaminen työllistää tällä hetkellä yli 200 henkilöä.

f) Tutkijankoulutus

Nanotieteen poikkitieteellinen tutkijakoulutus on alkanut HY:n ja TKK:n yhteishankkeena vuonna 2004, jolloin aloitettiin nanobiotieteen erikoiskurssin luennointi. Vuonna 2005 käynnistettiin laajamittainen kaikki nanotieteen alat kattava koko vuoden kestävä neljän kurssin monitieteinen luentosarja *Nanoscience* I-IV, jonka luennoimiseen osallistuu professoreita kaikilta neljältä kampukselta. Kurssilla on syksyllä 2005 ollut lähes sata kuulijaa. Sen lisäksi osapuolet osallistuvat eri tutkijakouluihin, esim. kansalliseen nanotieteen tutkijakouluun. Nanotiedettä ja -teknologiaa kehittäviä tohtoriopiskelijoita on yli 150.

4.1.2 Jyväskylän nanotiedekeskus NSC

Jyväskylän yliopistossa nanotiede ja nanoteknologia käsittävät 10 professorin johtaman 80 tutkijan monitieteisen tutkimuskonsortion, tutkijankoulutuksen ja kansainvälisen maisteriohjelman keskuspaikkanaan Jyväskylä NanoScience Center (NSC). Tutkijoilla on käytettävissään 2004 valmistuneessa keskuksessa modernit tutkimuslaitteet ja puhdistilat.

a) Tutkimuksen profiili ja keihäänkärjet

Jyväskylässä nanotieteen ja nanoteknologian tutkimuksen fokus on *molekyyllitason funktionaaliset systeemit ja laitteet*. NSC:n vahvuus juuri tällä alueella perustuu siihen, että aiheen tutkimus vaatii poikkitieteellistä lähestymistä ja laaja-alaista osaamista. NSC:n tutkimuskonsortioista löytyvät tarvittavat tieteellinen osaaminen ja metodologinen valmius erinomaisella tavalla: NSC:n vahvuuksia ovat supramolekyylikemia ja makromolekyylien synteesi, nano- ja molekyyllielektroniikka, molekyyliprosessien dynamiikan tutkimus femtosekuntiskaalassa, molekyylikytkimet ja -moottorit ja solun biologisten molekyylien tunnistus, sekä makromolekyylien ja nanoklustereiden teoria ja mallinnus. Menetelmäosaaminen ja nanokeskuksessa sijaitsevat laitteistot kattavat nanorakenteiden valmistuksen ja nanoelektroniikan mittaukset, kryogeniikan, atomitasoisen mikroskopian, edistyneet optiset spektroskopiat ja röntgensironnan, solu- ja viruslaboratorion sekä biokuvantamisen. NSC:llä on esimerkiksi erinomainen mahdollisuus yhdistää nanoelektroniikan ja (nano)optiikan ja lasermenetelmät yksittäismolekyyllitasolla. Lisäksi NSC:stä löytyy tähän tutkimuksen keskiöön läheisesti liittyviä ja sitä tukevia vahvuusalueita, kuten nanokiteiset puolijohderakenteet, kvanttipisteiden ja kvantti-kaasujen fysiikka sekä virustutkimus ja molekyyli-tunnistus. Toiminta pohjautuu fysiikan, kemian ja bio- ja ympäristötieteiden laitoksilla tehtyyn perustutkimukseen, jota on suunnattu 2000-luvun alusta yhteisiin, monitieteisiin nanotieteen ja nanoteknologian tutkimushankkeisiin. Vuoden 2000 jälkeen tehdyissä rekrytoinneissa viisi professuuria on suunnattu nanotieteeseen.

NSC on poikkitieteellinen tutkimuslaitos, jossa fysiikan, kemian ja biotieteiden tutkijat työskentelevät yhteisissä työhuoneissa ja laboratorioissa ja eri alojen tutkimuslaitteet ovat kaikkien käytössä. Kooltaan NSC (10 professoria, 80 tutkijaa) muodostaa kriittisen massan, mutta on riittävän kompakti joustavaan toimintaan, tehokkaaseen epäviralliseen informaati-onkulkuun ja ideoiden nopeaan toteuttamiseen. Nämä seikat sekä hyvin organisoitu toiminta- ja johtamismalli (mm. kaikkien professoreiden tieteellinen ja hallinnollinen kokous vähintään kerran kuukaudessa, viikoittaiset yhteiset seminaarit) ovat mahdollistaneet selkeän strategian luomisen yksikölle. Tämä on myös mahdollistanut keihäänkärkitutkimusaiheiden valitsemisen siten, että ne ovat *uusia, haastavia, aidosti poikkitieteellisiä ja nanotieteen keskiöön kuuluvia projekteja, joissa tarvitaan eri tutkimusryhmien (fysiikan, kemian ja biologian asiantuntijoiden) päivittäistä yhteistyötä ja samassa talossa olevaa laaja-alaista tutkimusinfrastruk-*

tuuria. Keihäänkärjet on valittu ottaen huomioon NSC:n tutkijoiden jo olemassa oleva kansainvälisesti korkeatasoinen, osin maailman huippuun kuuluva tutkimus, sekä odotettavissa oleva lisäarvo kun nämä osaamisalueet yhdistetään.

NSC:n tutkimuksen fokukseen *molekyyli-tason funktionaaliset systeemit ja laitteet* kuuluvat alla listatut *keihäänkärjet*.

1. Molekyyli-tason systeemien ja laitteiden

kontrolloitu rakentaminen, erityisesti bottom-up -menetelmin

Tähän kuuluvat erityisesti funktionaalisten supramolekyylien synteesi- ja rakennetutkimukset ja molekyyli-elektroniikan komponenttien rakentaminen yhdistämällä perinteisiin litografisiin menetelmiin ja uusimpiin ohutkalvotekniikoihin myös molekyylien itseorganisoituvuuden hyödyntämistä sekä molekyylien ohjailua sähkömagneettisilla kentillä. Perinteinen top-down valmistusteknologia toimii nykyään kaupallisestikin jo satojen nanometrien mittakaavassa (tutkimuslaboratorioissa alle kymmenen nanometrin) ja uudet tekniikat, esimerkiksi nanopainotekniikka (NIL) ovat voimakkaassa tuotekehitysvaiheessa. NSC:n tutkimus sen sijaan tähtää *seuraavan sukupolven* valmistustekniikoihin, joissa bottom-up -lähestymistavan uskotaan tarjoavan pienempiä mittakaavoja, alhaisempia kustannuksia ja molekyylien funktionaalisten ominaisuuksien hyödyntämistä. Funktionaalisten molekyylien synteessin kokeellista työtä tuetaan mallintamalla mm. hiilinanoputkien ja rotakseenien komplekseja.

Perustelu keihäänkärkiasemalle: Nanoelektroniikassa Jyväskylän yliopistolla on pitkäaikainen kokemus, joka on tuottanut runsaasti korkeatasoisia julkaisuja ja useita patentteja. Tällä alalla NSC:ssä on tapahtunut jonkin aikaa sitten sukupolvenvaihdos ja laajentuminen molekyyli-elektroniikkaan. Ensimmäiset tulokset ovat syntyneet nopeasti. Tutkimustuloksia on julkaistu mm. lehdissä *Nano Letters* ja *Physical Review Letters*.

Supramolekyylikemian osaaminen perustuu yli 15-vuotiseen yhteistyöhön maailman johtavien tutkijoiden kanssa, mm. vuoden 1987 nobelisti Jean-Marie Lehn (14 yhteisjulkaisua). NSC:ssä sijaitsee kiistatta Suomen kansainvälisesti korkeatasoisin supramolekyylikemian tutkimuskeskittymä ja tutkimustulokset julkaistaan korkeimman tason julkaisusarjoissa, *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, *Angewandte Chemie*, *Journal of the American Chemical Society*, *Chemical European Journal*, *Organic Letters*. Nanotieteeseen ja supramolekyylikemiaan liittyviä patentteja ja patenttihakemuksia on useita.

Nanotieteen teoria ja numeerisesti vaativa mallinnus on erittäin korkeaa tasoa NSC:ssä. Nanotieteen teoria ja mallinnus (mm. nanokatalyyti, klusterit, kvanttipeitteet, mesoskooppiset fermionisysteemit) on tuottanut julkaisuja huippulehdissä, kuten *Science*, *Nature Materials*, *Reviews of Modern Physics*, *Nano Letters*, *Physical Review Letters* ja *Journal of the American Chemical Society*, sekä kutsuttuja esitelmiä maailman tärkeimpiin tieteellisiin konferenssiin kuten APS March Meeting. Lisäksi varsinaiseen nanotieteeseen kuulumattomia, mutta sitä lähellä olevia julkaisuja on esimimerkiksi *Physical Review Letters* -lehdessä.

EU-rahoitus. NSC on mukana neljässä tutkimuksen 6. puiteohjelman EU-projektissa ja on yhden koordinaattori. Hankittu ulkopuolinen kansallinen ja kansainvälinen rahoitus on merkittävä.

Huippuyksiköt. NSC kuuluu yhteen Suomen Akatemian huippututkimusyksikköön (Center of Excellence in Nuclear and Condensed Matter Physics 2000–2005), ja siellä toimii viisi Suomen Akatemian viisivuotisessa akatemiattutkijan virassa olevaa nuorta tutkijaa.

Tiedepalkinnot. NSC:hen on tullut tiedepalkintoja, esimerkiksi Magnus Ehrnroothin palkinto 2005 (supramolekyyli- ja nanokemia), Väisälän palkinto 2003 (nanofysiikka), sekä merkittävä (miljoona euroa) EURYI-palkinto 2005 (nanofysiikka). Eurooppalaisella tasolla kilpailtu EURYI-palkinto antaa samanlaiset toimintaresurssit kuin akatemiaprofessuuri.

2. Molekyyli- ja systeemien vuorovaikutus ympäristön kanssa

Funktionaalisia molekyyli- ja systeemien vuorovaikutuksia ei voida tarkastella eristettynä ympäristöstään, ja nanomittakaavassa ympäristön vaikutus on usein määräävä sekä vaikeasti mitattava ja mallinnettava tekijä. Tähän keihäänkärkeen kuuluvat erityisesti funktionaalisten molekyylien käyttäytymisen tutkimus solukalvoissa ja erilaisilla pinnoilla, sekä molekyylien ja nanoelektrodien sähköisten kontaktien tutkimus. *Ab initio* -molekyyli- ja systeemien vuorovaikutusta käyttäen mallinnetaan mm. molekyylien ja metallien kontakteja, joita tutkitaan kokeellisesti NSC:ssä nanoelektronikan ja molekyylibiologian yhteistyönä. Teoreettisen ja kokeellisen tutkimuksen yhdistäminen samassa tutkimusyksikössä (NSC) on erityisen tärkeää tässä keihäänkärjessä.

Perustelu keihäänkärkiasemalle: Nanotieteen teoria ja numeerisesti vaativa mallinnus katso edellä.

Nanoelektronikka katso edellä.

Virustutkimus ja molekyyli- ja systeemien vuorovaikutus ovat vahvuutena biotieteissä. Erityisesti tutkitaan soluadheesioproteiinien ja virusten rakennetta ja toimintaa. NSC:ssä käytetään ja kehitetään atomivoima- ja konfokaalimikroskooppitekniikoita, joilla pyritään karakterisoimaan biomolekyylien, nanopartikkeleiden ja virusten käyttäytymistä solun pinnalla ja niiden sisäänottoa soluun. Biologinen rakennetutkimus NSC:ssä selvittää virusten, soluadheesioproteiinien ja näiden toimintaan liittyvien solutukirankaproteiinien rakenteita. Toiminnallisen ja rakennetiedon perusteella pyritään siihen, että virusten ja nanopartikkeleiden sisäänottoa soluihin voidaan ohjata halutulla tavalla. Tuloksia on julkaistu esimerkiksi lehdissä *Nature*, *Molecular Biology of the Cell*, *Journal of Biological Chemistry* ja *Journal of Virology*. Tutkimuksesta on syntynyt useita patentteja ja patenttihakemuksia. Uusilla rekrytoinnilla on vahvistettu erityisesti proteiini- ja rakennetutkimusta.

EU-rahoitus, huippuyksiköt, tiedepalkinnot katso edellä.

3. Yksittäisten molekyylien ja nanorakenteiden tutkimus ultranopeilla ja alle aallonpituuden kentillä

Molekyyli- ja systeemien vuorovaikutusten seuraaminen ajassa vaatii ultranopeita (femtosekunti) optisia pulssseja. Tätä NSC:n vahvaa aluetta tullaan hyödyntämään nanotieteessä erityisesti yksittäismolekyyli- ja systeemien vuorovaikutuksen tutkimuksessa. Toisaalta yksittäisten makromolekyylien ja nanorakenteiden vuorovaikutus alle aallonpituuden kenttien (esimerkiksi optiset ja terahertsialueen lähikentät) voi paljastaa täysin uusia ilmiöitä. Tähän liittyen on käynnistetty useita uusia projekteja. Erityisenä tavoitteena on lähikenttävuorovaikutuksen ja varauskuljetusmittausten yhdistäminen yksittäisten molekyylien ja nanorakenteiden tapauksessa. *Ab initio* -molekyyli- ja systeemien vuorovaikutusta käyttäen mallinnetaan molekyylien ja metalliklusterien elektronisten viritysten dynamiikkaa.

Perustelu keihäänkärkiasemalle: Femtosekuntispektroskopian ja matalan lämpötilan kemian tutkimukset ovat luoneet vahvan tietotaidon optisissa aikaerotetuissa mittauksissa. Kansainvälinen yhteistyöverkosto on laaja ja sisältää esimerkiksi kuulumisen European Laser Lab -hankkeeseen ja yhteisjulkaisuja nobelisti D.M. Leen kanssa. Tutkimuksia, jotka sinänsä eivät ole nanotiedettä, mutta tarjoavat optiikan asiantuntemusta uusiin nanoprojekteihin, on julkaistu mm. *Journal of American Chemical Society* ja *Nature* -lehdissä.

Nanoelektronikka katso edellä.

Nanotieteen teoria ja numeerisesti vaativa mallinnus katso edellä.

EU-rahoitus, huippuyksiköt, tiedepalkinnot katso edellä.

Yllä mainitut julkaisujen lukumäärät perustuvat NSC:n tutkijoiden nanotieteen julkaisuihin vuosina 2000–2005. Nanotieteen julkaisuja tällä aikavälillä on yhteensä 290, joista 40 lehdissä, joiden IF on 7 tai korkeampi. NSC:n tutkijoiden kaikkien julkaisujen määrä tällä aikavälillä on yli 500, joista yli 65 IF 7 tai korkeampi lehdissä.

Muu nanotieteeseen liittyvä tutkimus

NSC:ssä tehdään, yhteistyössä teollisuuden ja omien spinoff-yritysten kanssa, myös yllämainittuihin aihealueisiin läheisesti liittyvää *nanotieteen soveltavaa tutkimusta* (hiilinanoputkien puhdistus, funktionalisointi ja käyttö materiaaleissa; nanopartikkeleiden käyttö aurinkoenergian hyödyntämiseen), joista on viimeisen kahden vuoden aikana syntynyt spinoff yritys Nanolab Systems ja 19 patenttihakemusta sekä *nanotiedettä hyödyntävää tai sitä lähellä olevaa tutkimusta* (uudet bioanturit magneettisia ja optisia leimapartikkeleita käyttäen); 3D-aikaerotteinen biokuvantaminen fluoresenssimikroskopiaa käyttäen; mikrosensorit (ja mikro-nano-rajapinnan elektroniikka), joista on viime vuosina syntynyt yksi patentti, yksi patenttihakemus ja useita yrityksissä tuotekehitykseen siirtyneitä prototyypppejä.

NSC:n tutkimuksen sovellusalueita voivat olla uudenlaiset sensorit ja elektroniikan ratkaisut ja niiden uudenlaiset massavalmistustekniikat (esimerkiksi itseorganisotuvuutta hyödyntävät), uudet energiatekniikan sovellutukset, aktiiviset pinnoitteet, sekä bio-läheiset sovellutukset, kuten yksittäisten molekyylien (mm. lääkemolekyylit, proteiinit ja virukset) liikkeet solun sisällä tai solukalvossa.

b) Infrastrukturi

NSC puhdastiloineen valmistui syksyllä 2004 (11 miljoonaa euroa). Varustamisen rahoitti opetusministeriö. Puhdastilojen koko on noin 200 m², ja ne on mitoitettu siten, etteivät ylläpitokustannukset kasva tutkimustoimintaa rajoittavaksi tekijäksi eli tutkimusryhmillä on puhdastiloihin rajaton käyttömahdollisuus ilman lisenssejä. NSC saa noin 5,5 miljoonan euron tutkimuslaitteet vuosina 2004–2006. Pääasialliset rahoittajat ovat EAKR (2,2 miljoonaa euroa), Suomen Akatemia (infrastruktuurirahoitus miljoona euroa), Jyväskylän yliopisto (1,2 miljoonaa euroa). Tutkimuslaitehankintoja rahoittavat myös mm. Jyväskylän kaupunki ja teknologiakeskus, ESF sekä metsä-, metalli- ja elektroniikkateollisuus. Tällä luodaan kattava perusinfrastrukturi, mutta nopeasti kehittyvässä nanotieteessä laitteiden ajanmukaistaminen vaatii investointeja myös jatkossa.

c) Voimavarat

Jyväskylän nanotieteen kokonaisrahoitus oli 7,2 miljoonaa euroa vuonna 2004. Suoran budjettirahoituksen (yliopiston oman panostuksen) osuus oli tästä 3,2 miljoonaa euroa, Akatemian 1,9 miljoonaa euroa, Tekesin 0,4 miljoonaa euroa, EU:n 0,8 miljoonaa euroa, yritysrahoituksen 0,4 miljoonaa euroa ja muun ulkopuolisen rahoituksen osuus 0,5 miljoonaa euroa.

d) Teknologiansiirto ja yritysyhteistyö

NSC tarjoaa tutkimus- ja tuotekehityslaboratorioineen yrityksille ja muille tutkimuslaitoksille mahdollisuuden tehdä tutkimusta ja tuotekehitystä NSC:ssä ajantasaisella laitteistoilla alan tutkijoiden opastuksessa ja yhteistyössä heidän kanssaan. Yhteistyötä tehdään tällä hetkellä useiden puunjalostus-, metalli- ja elektroniikkateollisuuden yritysten kanssa, mm. Tekesin FinNano-teknologiaohjelmassa (NSC koordinoi yhtä tutkimushanketta). Tavotteena on rakentaa prototyyppien valmistukseen ja pienimuotoiseen tuotantoon soveltuva tuotekehitysympäristö nanoteknologian yrityksille. Yhteistyöyrityksiä ovat mm. Nokia, Metso, Moventas, Planar, UPM-Kymmene, MetsäSerla, M-real, Vapo, Enermet, Fortum, Vaisala, Oxford Instruments Analytical, Biofellow, Immunodiagnostic ja Nanolab Systems.

NSC tuottaa ja välittää nanotieteen ja nanoteknologian huippututkimusta ja asiantunte-
musta suomalaisen yhteiskunnan tarpeisiin. Tämä tapahtuu Jyväskylässä valituilla nanotieteen
ja nanoteknologian strategisilla ja kärkialoilla tehtävän korkeatasoisen tutkimuksen, yritysten
ja muiden tutkimuslaitosten kanssa tehtävän tutkimus- ja tuotekehitysyhteistyön sekä
tohtori- ja kansainvälisen maisterikoulutuksen kautta. NSC järjestää vuosittain kansainvälisen
konferenssin Nanoscience Days välittääkseen monipuolisesti ja laaja-alaisesti uusinta tietoa
nanotieteen ja nanoteknologian huippututkimuksesta maailmalla.

Nanoteknologia kuuluu Jyväskylän paperi-, ympäristö- ja energiateknologian osaamis-
keskus-ohjelmaan ja sillä on keskeinen asema myös Jyväskylän hyvinvointiteknologian alue-
keskusohjelmassa. Yritystoimintaa tukevaa ja palvelevaa yhteistyökonseptia rakennetaan ja
kehitetään yhteistyössä Jyväskylän Teknologiakeskuksen (JSP) kanssa tavoitteena myös uusien
yritysten synnyttäminen.

e) Tutkijankoulutus

Jyväskylä koordinoi kansallista Nanotieteen tutkijakoulua yhdessä pääkaupunkiseudun
kanssa. Tutkijankoulutusta järjestetään yhdessä muiden alan yliopistojen kanssa, ja mm.
Jyväskylän kansainvälisessä kesäkoulussa, jossa opettavat kansainvälisesti arvostetut asian-
tuntijat. Koulutuksessa yhdistetään fysiikan, kemian, biotieteiden ja teknologista erityisosa-
amista. NSC:n kansainvälistä nanotieteen maisteriohjelmaa varten on tehty uusia kursseja,
jotka käsittelevät nanotiedettä laajasti ja poikkitieteellisesti. Valmistuneet osaavat soveltaa eri
alojen tutkimusmenetelmiä ja työskennellä monitieteisissä tutkimusryhmissä. Koulutukseen
integroidaan kaikilla tasoilla nanoteknologian liiketoimintaosaamista ja -johtamista. NSC
tuottaa vuosittain 10–15 tohtoria.

4.1.3 Tampere-Joensuun nanofotoniikan osaamiskeskittymä

Tampereen teknillisen yliopiston (TTY), Joensuun yliopiston (JoY) ja Oulun yliopiston
(OY) *optoelektroniikan ja nanofotoniikan konsortio* muodostettiin 2004 tiivistämään alan
yhteistyötä. Konsortiota rahoittaa 2005–2006 opetusministeriö 1,5 miljoonalla eurolla.
Osaamiskeskittymällä on laaja koulutus- ja tutkimusyhteistyö muiden kotimaisten ja ulko-
maisten yliopistojen ja teollisuuden kanssa.²¹ Konsortion tutkimukset lukuisine sovelluksi-
neen ovat innovatiivisia, aidosti kansainvälisiä ja verkottuneita, ja niitä tukee voimakkaasti
suomalainen teollisuus.

Tässä luvussa kuvataan *nanofotoniikan* konsortioon kuuluvien TTY:n ORC:n, fysiikan ja
kemian laitosten sekä JoY:n fysiikan laitoksen nanofotoniikan tutkimusta ja keihäänkärkiä.
OY on konsortiossa ionisuihkulitografian alihankkijana. OY:n nanoteknologian tutkimuksen
vahvuusalueita, nanorakenteiden integrointia (sähkökeraamit), käsitellään luvussa 4.2.1.

a) Osaaminen, fotonikan tutkimuskonsortio

Fotoniikka on *lupaava perustutkimuksen ja uuden teknologiateollisuuden ala Suomessa*. Sen
ennustetaan nousevan keskeiseksi tutkimuksen ja tuotekehityksen alaksi maailmassa tällä
vuosikymmenellä ja kypsyvän osaksi yhteiskunnan infrastruktuuria. Ala on vahva Yhdys-
valloissa, Japanissa, mutta myös Pohjoismaissa, Saksassa, Ranskassa ja Englannissa. Pohjois-

²¹ Kotimainen ja kansainvälinen yhteistyö on poikkeuksellisen laajaa.

maista tutkimusta on kuvattu ORC:n 2005 toimittamassa raportissa²².

Fotoniikalla tarkoitetaan toimintoja ja sovelluksia, joissa hyödynnetään fotonin hallittua vuorovaikutusta materiaalin kanssa. Nanofotoniikalla tarkoitetaan tähän vuorovaikutukseen perustuvien uusien tutkimusmenetelmien ja teknologioiden kehittämistä makro- ja mikro-maailmasta poikkeavien nanomittakaavan fysikaalisten, kemiallisten ja biologisten prosessien tutkimiseksi.

TTY-JoY -konsortioon osallistuvissa yliopistoissa keskeisiä fotoniikan tutkimuskohteita ovat nanopainotekniikka, fotonikiteet, aalto-optinen tekniikka, ultranopeiden optisten pulssien lasertekniikka, mittaus- ja anturitekniikka, molekulaarinen nanoteknologia ja painettavat OLEDit. Tulevaisuuden UBI -ympäristö on tärkeä mikro- ja nanofotoniikan sovelluskohde. Kauempana tulevaisuudessa nanofotoniikkaa tarvitaan *optisiin tietokoneisiin ja kvanttimekaanisiin tiedon salaustekniikoihin*.

Tutkimuksen profiili ja keihäänkärjet

(i) Ohutkalvotekniikka mikro- ja optoelektroniikan nanorakenteisten komponenttien valmistukseen ja teollisiin sovelluksiin.

Ohuiden kalvojen pääasiallinen valmistustekniikka on molekyyliuuhkuepitaksia (MBE), tieteellisesti ja teollisesti.

ORC/TTY:n MBE soveltuu funktionaalisten nanorakenteiden valmistukseen. Funktionalisuudella tarkoitetaan nanorakenteiden kykyä synnyttää stimuloitua emissiota, moduloida signaalia satojen gigahertsien taajuudella, tuottaa femtosekuntiluokan pulsseja, muuttaa valon polarisaatiota tai aiheuttaa voimakkaita epälineaarisia optisia ilmiöitä. ORC on kuudella MBE -reaktorilla, joilla nanorakenteet valmistetaan, alan suurin yliopistollinen tutkimuskeskus Euroopassa ja epitaksiaalisten yhdistepuolijohteiden ja lasereiden valmistusteollisuuden alkuunpanija Suomessa.

MBE:llä valmistettuja 1D-, 2D- tai 3D-rakenteita sovelletaan uusimpiin lasereihin, modulaattoreihin, epälineaarisiiin peileihin ja fotonikiteisiin.

Viimeksi (2005) ORC on palkittu *Uuden Teknologian Säätiön* palkinnolla nanofotoniikan sovelluksesta. ORC:lla on edustus *New Journal Physics* -lehden toimituskunnassa ja usean kansainvälisten tiedejärjestöjen johtokunnissa sekä *Kista Photonics Research Centre* (KTH, Tukholma) -johtokunnassa. ORC toimi *EU Marie Curie Doctoral Training* -keskuksena 2000–2004.

ORC koordinoi parhaillaan kolmea EU FP6 STREP -hanketta (*Uranus*, *Fast Access* ja *Natal*, 2004–2007). Hankkeissa tehtävät optokomponentit nojaavat MBE:llä valmistettaviin nanorakenteisiin ja nanolitografisiin pintareliefeihin. Kahdessa muussa EU-hankkeessa ORC on jäsen (*Monopla* ja *Delila* 2002–2008). Aikaisempia EU-hankkeita on useita. Lähes kaikki hankkeissa valmistettavien optokomponenttien funktionaaliset osat ovat nanorakenteita. Kansainvälisyyttä ja poikkitieteellisyyttä korostavat käynnissä olevat verkostohankkeet (*COST 288* ja *EU Photonics Network*) sekä alkava *Nordic Photonic Promotion Forum*.

ORC:n jatko-opiskelijat osallistuvat tohtorikouluihin. ORC:lla on *Elektroniikan (GETA)*, *Materiaalifysiikan* ja TTY:n omassa tohtorikoulussa kussakin kaksi paikkaa.

Rahoitusorganisaatiot ja yritykset ovat tukeneet ORC:n ohutkalvotutkimusta ja laserteknologiaa lähes 10 miljoonalla eurolla 2000–2005. Laiteinvestoinnit ovat 16–17 miljoonaa

²² ORC: "Optiikka ja optoelektroniikka Pohjoismaissa 2004: Selvitys optiikan ja optoelektroniikan tutkimuksesta Suomessa ja muissa Pohjoismaissa", ISBN 952-15-1343-8, ISSN 1795-6293

euroa, ja niitä hyödynnetään 2005 perustetussa osaamiskeskittymässä nimeltä Laser Competence Centre Finland. LCC Finlandiin kuuluu kolme toimintayksikköä (laserkoetehdas, teollisuuden palvelukeskus ja teollisuuden koulutusyksikkö). Siihen investoidaan kaikkiaan 24–27 miljoonaa euroa vuoteen 2009 mennessä. Suunnitelmissa on, että nykyisen 21 yrityksen lisäksi 20–40 uutta yritystä liittyy LCC Finlandiin.

ORC:n koordinoima nanofotoniikkaa koskeva hanke on yksi Tekesin 15 projektista *FinNano -teknologiaohjelmassa* 2006–2008.

Nanofotoniikan ja optoelektroniikan tutkimus yhdessä ovat synnyttäneet uuden vientiteollisuuden: diodi- ja kuitulasertuotannon sovelluksineen, joka sivuaa nanoteknologiaa. Kymmenen TTY:stä ja JoY:sta syntyneen lasereita tuottavan tai soveltavan uuden yrityksen yhteenlaskettu liikevaihto oli 14 miljoonaa euroa 2004, nousee 20 miljoonaan euroon 2005 ja arvioidaan olevan 30 miljoonaa euroa 2006. Liikevaihdon kehitys yhdessä EU- ja ESA-hankkeiden kanssa osoittaa konkreettisesti tutkimuksen tason kyseisissä yliopistoyksiköissä ja peilaa yritysmaailman selkeää luottamusta akateemisen tutkimuksen laatuun. Yritykset ovat avanneet tähän mennessä yli 150 uutta työpaikkaa, eivätkä ole siirtäneet tuotantoaan halpamyönteisyyksiin. Työpaikkojen määrä on liikevaihdon ja korkeatasoisen julkaisutoiminnan ohella kolmas kiistan osoitus akateemisen tutkimuksen ansioista ja hyödyllisyydestä.

(ii) Nanopainotekniikka

Erityisesti soft-embossing-NIL kehittyy nopeasti kaikkialla maailmassa, mutta ei ole vielä teollisessa tuotannossa. Alan johtavia ryhmiä Euroopassa on Micronovassa toimiva VTT Tietotekniikka. Tampereella on hiljattain aloitettu nanopainotekniikan kehitys. Kehityksen ripeyttä kuvaa NIL-kuvioiden lähestyminen nanomittakaavaa: toukokuussa 2005 ORC:n soft-embossing-NIL-kuviot olivat kooltaan 1 000 nm, elokuussa 300 nm, ja nyt uudet litografiamaskit sisältävät 75 nanometrin kuvioita, joita aletaan painaa marraskuussa 2005. Ensimmäinen *patenttihakemus* on jätetty sovelluksesta painaa diffraktiokuvio optisen tietoliikennekuidun päähän (ORC). Keksintö vähentää tarvetta käyttää mikrolinssejä valon kollimointiin tai fokuointiin.

Ensimmäiset kansainväliset yhteistyöhankkeet NIL-tekniikassa käynnistyvät 2006, jolloin ORC aloittaa Euroopan avaruusjärjestön rahoituksella satelliitteihin asennettaviksi tarkoitettujen lasereiden kehitystyön. Siinä DFB-tyyppinen optisen kentän takaisinkytkentä perustuu NIL-valmistisiin pintakuviointeihin ilman kallista kaksivaiheista kasvatusprosessia, mikä nykyisin joudutaan aina suorittamaan. Toinen tutkimusyhteistyö alkaa englantilaisten yliopistojen kanssa 2006. Siinä nanopainomenetelmää sovelletaan spintroniikan -kvanttipistematriisien MBE-kasvatukseen tiettävästi ensimmäistä kertaa maailmassa. Lisäksi valmistellaan NIL-tekniikkaa koskevaa EU:n tutkimuksen 7. puiteohjelmanhanketta ja liitytään 2–3 verkostohankkeeseen edistämään nanopainomenetelmän kehitystyötä Suomessa.

(iii) Korkean hyötysuhteen diffraktiohilat

JoY:n fysiikan laitoksen diffraktiivisen optiikan kärkiryhmä kuuluu ORC:n johtamaan kahden yliopiston muodostamaan poikkitieteelliseen, tieteellisesti, teknisesti ja teollisesti erittäin menestyneeseen konsortioon. Diffraktiivisessa optiikassa valoa kontrolloidaan aaltooptiikalla, ei perinteisellä sädeoptiikalla. Diffraktiiviset elementit ovat pintarakenteita, joiden syvyys on 10–500 nm ja poikkittaiset rakennekoot 10–50 nm. Rakenteet valmistetaan elektronisuihkulitografialla. Räätelöidyllä diffraktiohilalla saavutetaan korkeita diffraktiohyötysuhteita ja voimakkaita polarisaatioefektejä. Tämä keihäänkärki (JoY, fysiikan laitos) edellyttää teorian yhdistämistä kokeisiin ja elektronisuihkulitografian hallintaa. Diffraktiivisilla elementeillä on kasvava merkitys näyttötekniikassa.

Joensuun yliopiston fysiikan laitoksen tutkimuksen vahvuus liittyy nanofotoniikkaan, jossa keskitytään yllä kuvattuihin diffraktiivisiin nanorakenteisiin. Erityisen mielenkiinnon kohteena ovat metalliset nanorakenteet, joilla on uudenlaisia lineaarisia ja epälineaarisia optisia ominaisuuksia (yhteistyö TTY:n fysiikan laitoksen kanssa). Niitä voidaan kontrolloidusti valmistaa tällä hetkellä vain elektronisuihkulitografialla (lähitulevaisuudessa myös soft-embossing-NIL:llä). Nanorakenteiden elementtien sovellukset kasvavat voimakkaasti. Sovellukset kattavat nanofotoniikan ja optoelektroniikan lisäksi mm. prosessitekniikan, lääketieteen ja varuustekniikan osa-aloja.

Ryhmällä ei ole EU-hankkeita, mutta se on keskeinen partneri *Nemo -Centre of Excellence in Micro-optics* -verkostossa. Ryhmässä on yksi akatemiaprofessori (2005–2010). Ryhmä on saanut *Vilho, Yrjö ja Kalle Väisälä Foundation* -palkinnon (2000). Fysiikan laitos toimii koordinaattorina kansallisessa *Modernin optiikan ja fotonikan* tutkijakoulussa.

Ryhmän tutkimustoiminta on synnyttänyt yhden yrityksen. Yritys työllistää 10 henkeä ja sen liikevaihto on noin miljoona euroa (2005).

JoY:n fysiikan laitoksella on erinomaiset nanolitografialaitteistot, jotka tarjoavat tutkijoille ensiluokkaisen infrastruktuurin. Laitos sisältää myös elektronisuihkulitografialaitteiston (uusitaan 2006). Laitoksella on monipuolinen laitteisto optiseen karakterisointiin.

(iv) Orgaaniset valokennot

Tämän nanofotoniikan keihäänkärjen osaaminen on nanokemian ja valokemian yhdistelmä. Nanokemia on molekulaarista suunnittelua ja rakentamista, jolla luodaan erityistoimintoja suorittavia molekulaarisia rakenteita. Se sisältää käsitteen *supramolekulaarinen kemia*, jolla on kaksi peruselementtiä. Näistä toinen perustuu metallo-orgaanisten rakenteiden valmistukseen synteettisen kemian keinoin, toinen saa aikaan rakenteellisen monimuotoisuuden itsejärjestyksen.

TTY:n kemian laitos tekee uraa uurtavaa työtä valo- ja nanokemiassa. Työ on synnyttänyt maahamme nuorten valokemistien "sukupolven". Valo- ja nanokemian ryhmästä on valmistunut 12 väitöskirjaa.

Osa työstä kohdistuu orgaanisen valokennon tutkimukseen ja kehittämiseen. Orgaanisella valokennolla pyritään vaihtoehtoiseen, ympäristöystävälliseen ja kustannustehokkaaseen energian tuotantoon. Orgaanisessa valokennossa syntetisoidaan elektronin luovuttaja- ja vastaanottaja -molekyylejä, jotka organisoidaan järjestäytyneeksi ultraohutkalvoksi elektroneja luovuttavien ja sähköä johtavien tai valoa absorboivien orgaanisten kalvojen pinnalle. Kerrosrakenteen päälle kasvatetaan vielä elektroneja vastaanottava orgaaninen kalvo. Lopputuloksena on molekulaarinen laite, joka tuottaa sähköenergiaa, kun siihen kohdistetaan näkyvää valoa.

Kemian laitoksen työ on kansainvälistä. Tätä osoittaa mm. merkittävimmän alan kansainvälisen konferenssin järjestäminen (*IUPAC Symp. Photochemistry*) ja edustus *International Foundation of Photochemistry* -hallituksessa sekä 2000 alkaen toiminta *European Photochemistry Association* -hallituksessa. Kemian laitos toimi myös ensimmäisen opetusministeriön nanoteknologia -tutkijakoulun *Molekulaarinen nanoteknologia* koordinaattorina vv. 1999–2002 ja kuuluu 2006 toimintansa aloittavan opetusministeriön *Kansallisen nanotieteen* tutkijakoulun johtoryhmään. Keihäänkärjeksi ehdotettu *Orgaaninen valokenno* on yksi Tekesin *FinNano*-teknologiaohjelman 15 hankkeesta. TTY:llä on kaksi Tekesin *FinNano*-teknologiaohjelman projektia (toinen on ORC koordinoima hanke).

Nanofotoniikan konsortion julkaisutoiminta

Konsortiolla on julkaisuja mm. seuraavissa lehdissä: *Science*, *Progress in Optics*, *Physics Review Letters*, *Journal of the American Chemistry Society*, *Applied Physics Letters*, *Optics Express*,

Biochemistry, Journal of Physical Chemistry B, Progress in Surface Science, Chemical Materials ja Optics Letters. Nanotieteen ja nanoteknologian julkaisuja 2000–2005 on yhteensä 175, joista kahdeksan lehdissä joiden IF on 7 tai korkeampi. Patentteja on kymmenen.

Konsortion jäsenet kuuluvat kuuden lehden toimituskuntaan: *New Journal of Physics (London)*, *Journal Optics, Society of America (USA)*, *Optik (Saksa)*, *Journal of Nonlinear Optical Physics Material*, *Photochemical & Photophysics Science*, *Journal of Photochemistry & Photobiology A*.

Nanofotoniikan tutkimuksen tuotto-odotukset

TTY:n ja JoY:n yksiköiden tähänastiset tulokset osoittavat, että on mahdollista siirtää pitkäjännitteisen perustutkimuksen innovaatioita yliopistosta elinkeinoelämään ja samalla luoda uutta, taloudellisesti merkittävää yritystoimintaa. Globaalissa kilpailussa tutkimustoiminnan ylläpito on kallista, mutta yhteiskuntamme hyvinvoinnin kannalta välttämätöntä. TTY:n ja JoY:n tutkimustoiminnasta lähteneiden yritysten liikevaihdon kehitykseen ehdotetuilla nanofotoniikan tutkimuksilla on suuri merkitys. Koska nykyiset spinoff -yritykset tekevät omine arvioidensa mukaan 27–31 miljoonan euron liikevaihdon 2006, niin haasteelliseksi tavoitteeksi voidaan asettaa 60–70 miljoonan euron liikevaihto 2009, kun kaikki nanofotoniikan ja optoelektroniikan tuotteiden ja palvelujen liikevaihdot lasketaan yhteen. Työpaikkoja näissä ja uusissa perustettavissa yrityksissä arvioidaan olevan yhteensä 250–300 vuonna 2009 (tällä hetkellä 170).

Nanofotoniikan alan konsortiossa tehdään väitöskirjoja 10–15 kpl ja lukuisia maisteritutkintoja 2007–2009. Teollisuus tarvitsee alan koulutettua työvoimaa, josta nyt on pula. Tieteellisten tulosten hyödyntämiseksi tehdään 10–15 lisensiointi- tai teknologian siirtosopimusta. EU:n tutkimuksen 7. puiteohjelman hankkeita valmistellaan aktiivisesti ja osallistutaan eurooppalaisiin tutkimusverkostoihin pyrkimyksenä laajentaa entuudestaan kansainvälistä toimintaa. Hyväksytyillä EU-projekteilla lasketaan hankittavan ulkomaista rahaa suomalaisen nanofotoniikan tutkimus- ja kehitystyöhön 2–3 miljoonaa euroa 2007–2009, eli hieman enemmän kuin konsortio nyt hankkii EU-projekteilla 2004–2007.

Tutkimustulosten hyödyntämiseksi käytetään useita keinoja. (a) Suuria odotuksia asetetaan etenkin *LCC Finlandille*, jonka toimintaan lasketaan saatavan 40–60 yritystä 2009 mennessä, jolloin LCC Finland muodostaisi poikkeuksellisen laajan kosketuspinnan yliopistojen ja teollisuuden välille ja lisäksi yritysten halukkuutta sijoittaa tutkimukseen. (b) Toinen konkreettinen teknologian siirtoa vauhdittava toimenpide on nanoteknisen protolaitteen rakentaminen messu- ja esittelykäyttöön jostakin nanofotoniikan mielenkiintoisesta innovaatiosta. (c) Kolmanneksi, kootaan *teknologiasalkku* ja rakennetaan spinoff -yritys hyödyntämään salkkua yhteistyössä tutkijoiden, IPR-asiantuntijoiden ja kaupallistamiskumppaneiden kanssa. (d) On mahdollista, että myös nanopainotekniikkaan syntyy uusi yritys, jos tutkimukset edistyvät ennakkoidulla tavalla. Yrityksen alkutaivalta tuetaan avustamalla liiketoiminnan suunnittelussa ja perustamiskustannuksissa. (e) Lisäksi suoritetaan kaupallistamisen *seuranta- ja arviointitutkimus*, jossa selvitetään yliopistoista jo syntyneiden yritysten menestyksen syitä. Analyysin pohjalta laaditaan *kaupallistamisstrategia* ja suositellaan *teknologiansiirtoprosesseja* yliopistojen käyttöön.

b) Tutkijankoulutus

TTY:ssa, JoY:ssa ja OY:ssa on valmistunut 35 väitöskirjaa nanotieteeseen luettavissa tutkimuksissa 2000–2005. Tutkijankoulutuksesta (kansallinen ja kansainvälinen) on tarkemmin luvussa 4.1.3.

c) Voimavarat

Konsortion nanofotoniikan kotimaisesta rahoituksesta pääosa tulee tutkimusprojekteista, rahoittajina Tekes, Suomen Akatemia, yritykset ja säätiöt. Ulkomainen rahoitus (EU, ESA ja ulkomaiset yritykset) on noin 2 miljoonaa euroa vuodessa; karkeasti neljäsosa kotimaisen rahoituksen määrästä. Vuosina 2007–2009 EU-projekteilla lasketaan hankittavan ulkomaista rahaa suomalaisen nanofotoniikan tutkimus- ja kehitystyöhön 2,5–3,5 miljoonaa euroa 2007–2009, eli hieman enemmän kuin konsortio hankkii EU-projekteilla 2004–2007.

Nanofotoniikan menestystä kuvaa nopeasti kasvaneet tutkijavoimat. ORC:n 2005 tekemän raportin mukaan optiikassa ja optoelektroniikassa työskenteli 2004 yli 300 henkeä TTY:ssa, JoY:ssa, TKK:ssa, HY:ssa, JY:ssa, TY:ssa, OY:ssa, LaY:ssa ja VTT:ssa. Vaikka kaikki eivät toimi nanofotoniikassa, huomattavalla osalla oli nanofotoniikan tutkimuksia, ja näitä oli selvästi enemmän kuin viisi vuotta sitten.

d) Infrastrukturi

TTY, JoY ja OY ovat tukeneet voimakkaasti nanofotoniikan ja fotonikan tutkimusta ja priorisoineet näitä aloja osoituksena yliopistojen luottamuksesta nanotekniikan tulevaisuuteen. TTY:n yhteyteen perustettiin 1999 Optoelektroniikan tutkimuskeskus (ORC) ja 2005 Laser Competence Centre Finland (LCC), johon kuuluu kolme yksikköä (laserkoetehdas, teollisuuden palvelukeskus ja teollisuuden koulutusyksikkö). LCC Finlandiin sijoitetaan noin 24–27 miljoonaa euroa 2009 mennessä ja siihen odotetaan liittyvän 40–60 pääosin suomalaista yritystä (tällä hetkellä organisaatioon kuuluu 21 jäsenmaksun maksanutta yritystä). ORC:n laiteinvestoinnit ovat 16–17 miljoonaa euroa (tutkimushenkilökuntaa 65 henkeä 2005). Pirkanmaan TE -keskus, Tampereen kaupunki ja yritykset myönsivät ORC:lle ja yhteistyökumppaneille 3,5 miljoonan euron lisätuen vuosille 2002–2005 infrastruktuurin kehittämiseksi entistä kilpailukyisemmäksi.

TTY:n, JoY:n ja OY:n laiteinvestoinnit fotonikkaan kokonaisuudessaan nousevat yli 30 miljoonan euron. JoY on toiminnallaan auttanut tilojen järjestämistä *InFotonics Centerille* Joensuun Tiedepuistoon ja rahoittanut nanotekniikan tarvitsemat puhdasilat. OY on perustanut *mikro- ja nanoteknologiakeskuksen*, johon on sijoitettu noin 10 miljoonaa euroa.

4.1.4 Muu nanotieteeseen ja -teknologiaan liittyvä korkeatasoinen tutkimus

Nanotieteen ja -teknologian tutkimuksen osaamiskeskittymien ja keihäänkärkien lisäksi Suomessa tehdään monissa korkeakouluissa ja ryhmissä erittäin korkeatasoista nanotieteeseen liittyvää tutkimusta. Monet niistä ovat voimakkaassa kehitysvaiheessa ja niistä voi omia vahvuuksia kasvattamalla ja verkostoitumalla syntyä lähivuosina uusia nanotieteen tutkimuksen ja -teknologian keihäänkärkiä. Työryhmän käsityksen mukaan ne eivät täytä vielä työryhmän nanotieteen ja -teknologian tutkimuksen osaamiskeskittymille ja keihäänkärjille asettamia kriteereitä. Seuraavassa kuvataan lyhyesti tällaisia tutkimuksen vahvuusalueita muissa kuin edellä mainittuihin konsortioihin kuuluvissa yliopistoissa. Helsinki-Nanon, Jyväskylän, Tampereen teknillisen yliopiston ja Joensuun yliopiston nanotieteen tutkimuksen vahvuusalueita ei tässä yhteydessä käsitellä, koska nämä yksiköt ovat nimenneet tutkimuksen keihäänkärkensä.

Oulun yliopisto vahvuusalue – Nanorakenteiden integrointi

Nanorakenteiden integrointi erityisaloinaan nanotyöstö ja -asemointi on Oulun yliopiston nanoteknologiaan liittyvän tutkimustoiminnan vahvuusalue, joka mahdollistaa toiminnalliset rakenteet fotonikan, optoelektroniikan ja tietoliikennetekniikan sovelluksiin. Tutkimukseen osallistuvat tutkimusryhmät toimivat fotonikan, optoelektroniikan, mikroaaltotekniikan, kemian, fysiikan, mittaustekniikan, materiaalitekniikan, elektroniikan, konetekniikan ja testaustekniikan alueilla. Yliopistolla on useita tutkimushankkeita, joissa on mukana yli kymmenen Oulun alueen teollisuusyrittästä anturi-, testaustekniikasta, nanokomposiiteista sekä nanoputken kasvatuksesta ja modifioinnista.

EU-projektit: Sanes (Integrated Self-adjusting Nano-electronic Sensors) EU STREP, käynnistyy 2005, Patent_DfMM (Design for Micro and Nano Manufacture on Network of Excellence).

Kansainvälinen yhteistyö: Nanotekniikan yhteistyötä on tehty Rensselaerin polyteknisen instituutin, Missourin yliopiston St. Louisin kampuksen sekä Arizonan valtionyliopiston kanssa.

Tutkijankoulutus. Oulun yliopistossa toimii 31-paikkainen Infotech Graduate School, joka osin tukee nanotekniikan tutkimusta ja tutkijakoulutusta.

Yritykset ja työpaikat: Laser Probe Oy, GuideOptics Oy, Braggone Oy. Oulun alueella on jo pitkään toiminut sähkökeraameihin perustuvaa teollisuutta, joka on parhaimmillaan luonut yli tuhannen työpaikan keskittymän.

Infrastruktuuuri: Oulun yliopistolla on ainoa Suomessa oleva FIB-laitteisto, (Focused Ion Beam), jolla voidaan tehdä sekä nanotyöstöä että -litografiaa. Laitteisto sisältää myös nanomanipulaattorin. Yliopistossa on hyvin varustettu mikro- ja nanoteknologiakeskus.

Turun yliopiston ja Åbo Akademin vahvuusalueet

Turun vahvuus on tiivis, monitieteinen kampusalue, jossa samalla alueella toimivat kolme yliopistoa, Turun ammattikorkeakoulu, Turun yliopistollinen keskussairaala, KTL, VTT, Turku Science Park ja useita bio- ja ICT-yrityksiä. Kampusalue on sopiva monitieteellisten alojen, kuten nanotieteen, kehittämiselle ja tutkimustulosten kaupalliselle hyödyntämiselle.

Turun yliopiston ja Åbo Akademin tutkimuksessa voi monialaiseen nanotieteeseen liittyen tunnistaa kaksi vahvuusaluetta:

(i) Biomateriaalitutkimuksen kehittäminen nanoteknologian suuntaan

Osa Turussa tehtävästä biomateriaalitutkimuksesta liittyy monialaiseen nanotieteeseen ja sitä tehdään lähinnä Turun yliopiston hammaslääketieteen laitoksella (Proteesioppi ja Biomateriaalitutkimus & Biomateriaalikeskus) ja Åbo Akademin fysikaalisen kemian laitoksella. Tutkimusyhteistyötä koordinoi *Biomateriaalien tutkimusohjelma, ja Turun biomateriaalikeskus* edistää tulosten kaupallista soveltamista.

Esimerkkeinä soveltavasta nanomateriaalikehityksestä mainitaan erityyppisten mesohuokosten (huokoskoko 2–50 nm) materiaalien hyödyntäminen oraalisisä lääkeannostelussa. Lääkemolekyylit ladataan nanohuukoisiin, jolloin niiden ominaisuudet, kuten liukoisuus, vapautumisen kinetiikka ja solukalvoläpäisevyys, oleellisesti muuttuvat perinteisesti annosteltuun lääkeaineeseen verrattuna. Lisäksi materiaalipuolella on nanotieteeseen liittyen tutkittu orgaanisia itsejärjestyviä nanorakenteita ja funktionalisoituja johdepolymeereja (konjugoitu polymeeri + reseptori). Tuloksia voidaan soveltaa nanoanturien kehittämiseen. Biosensorisovelluksiin on kehitteillä proteiinien ja solutarttumisen optimointia funktionalisoiduilla ohutkalvoilla ja sooligeelitekniikalla valmistetuilla nanorakenteisilla pinnoitteilla.

Vahvuusalueen ryhmät osallistuvat viiteen EU-hankkeeseen. Turun yliopiston ja Åbo Akademin tutkijat ovat mukana kahdessa SA:n huippuyksikössä: *Bio- ja nanopolymeerien huippuyksikkö ja Prosessikemian huippuyksikkö*.

(ii) Nanopartikkelien lääketieteellinen, kemiallinen, fysikaalinen, ja katalyyttinen tutkimus

Turun nanopartikkelitutkimus koostuu metallisten, orgaanisten ja epäorgaanisten nanopartikkelien ja hiilinanoputkien kemiallisesta tutkimuksesta, kemiallisten nanorakenteiden valmistuksesta (uusien partikkelien kehittäminen ja päällystysmenetelmät, hiilinanoputkien kemiallinen modifiointi ja erottelu, funktionaalisten nanokalvojen valmistus), nanopartikkelien soveltamisesta *in vitro* -diagnostiikkaan, nanopartikkelien ja -putkien biologiseen kohdentamiseen ja turvallisuuteen liittyvästä tutkimuksesta, katalyysistä, sekä orgaaniseen elektroniikkaan liittyvästä tutkimuksesta. Tutkimukseen osallistuu ryhmiä Turun yliopiston biokemian laitokselta, kemian laitokselta, lääketieteellisen tiedekunnan MediCity- tutkimuslaboratorios- ta, sekä Åbo Akademin fysikaalisen kemian ja fysiikan laitoksilta. Lääketieteellinen tutkimus on vasta aluillaan, mutta siitäkin on jo ensimmäiset julkaisut. Nanopartikkelien ja -putkien lääketieteellisten sovellutusten tutkiminen perustuu ryhmissä vuosia jatkuneiden tutkimuslin- jojen tulosten hyödyntämiseen. Nanokomponenttien bioturvallisuus on Suomessa uusi tut- kimuslinja. Lisäksi tällä alueella on osaamista nanopartikkelien konjugoinnista biomolekyy- leihin, näiden konjugaattien karakterisoinnista ja käyttämisestä erilaisissa sovelluksissa sekä nanokalvojen ja niissä käytettävien nanomittakaavan komponenttien tutkimuksessa. Turussa tutkitaan nanokokoisten katalyyttien ominaisuuksia tavoitteena selektiivisyyden ja aktiivisuu- den nostaminen. Fullereenien ja nanopartikkelien soveltuvuutta muistielementeiksi tutkitaan FinNano-hankkeessa yhteistyössä VTT:n ja TKK:n kanssa.

Vahvuusalueen ryhmät osallistuvat yhteen nanotieteen EU-hankkeeseen. Nanotekno- logiaan tulevaisuudessa liittyviä tutkimustuloksia on julkaistu seuraavissa lehdissä: *Immunity, Molecular and Cellular Biology, Journal of Experimental Medicine, Molecular Biology of the Cell*. Vahvuusalueella on yksi huippuyksikkö (*Soluliikenne*) ja yksi Anders Jahre -palkittu akatemiaprofessori.

Leimallisesti monitieteisten nanotieteen hankkeiden lisäksi elektroniikassa tutkitaan tule- vaisuuden laskenta- ja elektroniikkajärjestelmien toteutusta.

Bionanoteknologian tutkimus Tampereella

Tutkimuksen vahvuusalue on bioanturit

Tampereella (TaY, TTY ja VTT) tehtävässä bioantureihin liittyvässä tutkimuksessa yhdistyy luonnontieteiden, tekniikan ja lääketieteen osaaminen. Anturitekniikan magnetometrinen diagnostiikka -hankkeessa kehitetään immunodiagnostiikan sovelluksissa käytettävän magneettisen nanopartikkelileiman ilmaisua. Tavoitteena on ilmaista jopa yksittäinen nano- partikkeli miniatyrisoituun induktiokelaan perustuvalla laitteella. Toisessa anturitekniikan projektissa tutkitaan optista bioanturia. Tavoitteena on ilmaista immunoreaktiossa syntyvä immunokompleksi joko suoraan tai erillistä nanopartikkelileimaa käyttäen virittämällä molekyylikerroksessa laserin valon toinen harmoninen taajuus.

Bioanturit-ryhmä tutkii ja kehittää uudentyyppisiä, monifunktionaalisia bioantureita eri- koisanalyysiin ja pikadiagnostiikkaan. Bioanturit perustuvat uusiin detektio- ja immobili- sointimenetelmiin multianalyttisessä (matrix) konseptissa, jossa identifioidaan useita biokemiallisia aineita (esim. vasta-aineet) yhdestä pienitilavuuksisesta näytteestä. Antureiden

tunnistinmolekyyleinä voidaan käyttää muokattuja reportterimolekyylejä, joiden toiminta on optimoitu pinnoilla tapahtuvaksi valontuottoilmiöiksi. Molekyylien keskinäisiä vuorovaikutuksia tutkitaan yhdistämällä ei-signaalia tuottavia komponentteja toisiinsa muutaman nanometrin etäisyyksien tasolla mittaamalla valon intensiteettiä nollatilanteesta analyysin lisäämisen jälkeiseen silminnähtäviin valomääriin, joka edesauttaa uusien laitekonseptien syntyä.

Molekyylibioteknologian ryhmä tutkii proteiinien rakenteen ja toiminnan välisiä vuorovaikutuksia kohdennetun mutageneesin ja proteiinimuokkauksen avulla. Tärkein kohde on kanan avidiini, jonka sitoutuminen biotiini-vitamiiniin on voimakkain tunnettu ei-kovalentti sitoutuminen luonnossa. Tätä interaktiota käytetään laajasti ns. avidiini-biotiini-tekniologian lisäksi myös nanoteknologiassa biologisten tunnistin- tai leimausmolekyylien sitomisessa nanopartikkeleihin ja nanomateriaaleihin tai biosensoreiden detektiopintoihin. Sen avulla voidaan valmistaa järjestäytyneitä pintoja ja 2D-kalvoja. Avidiini ja muut biotiinia tiukasti sitovat proteiinit voidaan fuusioda erilaisiin biologista tunnistusta tai kohdentamista tekeviin molekyyleihin uudenlaisten nanomateriaalien tai nanolaitteiden valmistuksessa sekä uusien kohdennettavien hoitomuotojen ja geenihoitovektoreiden kehittämisessä

Ryhmien tavoitteena on yhdistää erilaisten teknologioiden osaajat uusien, valmisteluvaiheissa olevien laaja-alaisen konsortiohankkeiden kautta diagnostisten menetelmien ja hoitomuotojen kehittämiseen. Kohteena on Tampereen seudun vahvojen lääketieteen tutkimusalojen, kuten syöpätutkimus (erityisesti rint- ja eturauhassyövät), diabetes ja bakteeri- ja virusperäiset infektiaudit, rokotetutkimus sekä mahdollisesti keliakia. Hajoavat biomateriaalit sekä solu- ja kudostekniologia edustavat myös vahvoja osaamisaloja, joiden piirissä löytyy todellista nanotekniologian kehittämispotentiaalia. Ympäristön tilan monitoroinnissa ja tuotantomenetelmien optimoinnissa nanotekniologian menetelmät tarjoavat uusia mahdollisuuksia. Yhteistyötä tehdään Tampereen yliopistollisen sairaalan ja Finn-Medi -kampuksella toimivien yritysten kanssa. Yhteistyötä tullaan tekemään myös VTT Biotekniikan, Jyväskylän ja Kuopion yliopiston tutkijoiden kanssa sekä useiden kotimaisten nano- ja biotieteiden yritysten kanssa.

Soveltava, mm. työturvallisuuteen liittyvä tutkimus

Suomessa tehdään monissa yksiköissä merkittävää nanotieteen ja -tekniologian sovelluksiin liittyvää työtä, kuten nanomateriaalien turvallisuuden tutkiminen. Kansanterveyslaitoksen hiukkastutkimus kattaa ultrapienet hiukkaset terveys- ja ympäristöriskitutkimuksessa. Turun yliopistossa tehdään nanokomponenttien bioturvallisuuteen liittyvää tutkimusta. VTT kehittää EU-projektissa uusia menetelmiä nanohiukkasten havaitsemiseksi. Tavoitteena on selvittää mahdollisuudet nanohiukkasten eri ominaisuuksien määrittämiseksi sekä kehittää uusia mitta- ja karakterisointimenetelmiä. VTT osallistuu myös teollisuuslaitoksissa toteutettavan nanopartikkeleiden tarkkailun suunnitteluun ja toteutukseen. HY:n Fysikaalisten tieteiden laitoksella on nanokokoisten hiukkasten vaikutuksesta sisäilmastoon yhteisprofessori Työterveyslaitoksen kanssa ja siihen liittyvää yhteistyötä. Alalla on HY:lla yksi Suomen Akatemian ja kaksi pohjoismaista huippuyksikköä.

4.1.5 Tietotekninen infrastruktuuri

Nanotieteessä laskennalliset tieteet ovat merkittävämpiä kuin monilla muilla aloilla. Nano maailman rakennuspalikoita ovat atomit ja molekyylit. Mukana on voimakas kvanttimekaaninen luonne: laskennallisessa tutkimuksessa tarvitaan usein kvanttimekaniikan huomioon ottavia raskaita simulaatioita.

Nanomittakaavan ongelmat vaativat tyypillisesti moniskaala- ja monimetelmämallinusta, jossa malleja voidaan "karkeistaa" (coarse graining) suuremmalle mittaskaalalle säilyttäen silti tarkemman resoluutiomallin olennainen fysiikka. Karkeistusmallitkin perustuvat yleensä kvanttimekaanisen tason simulaatioiden tuottamaan informaatioon.

Laskennallinen tutkimus tuottaa verifioinnin ja ennustamisen kokeellista tutkimusta ohjaavan vaikutuksen lisäksi informaatiota, jota ei pystytä kokeellisesti tuottamaan johtuen pienistä aika- ja mittaskaaloista.

Nanotiedetutkimuksen monimutkaisuutta lisää laaja-alaisuus: tutkimus edellyttää fysiikan, kemian ja biologian tutkimuksen yhteydessä luotujen ohjelmistojen, mallien ja tietokantojen tehokasta rinnakkaiskäyttöä. Sovellusten käytön yleistyminen haastaa nanotieteen ja -teknologian osaamisen saatavuuden. Nanoteknologian sovellusten ja käytön yleistyessä nanotieteen ja -teknologian tutkimustietojen ja menetelmien tulisi olla yritysten, oppilaitosten ja kansalaisten saatavilla.

Suomen laskennallinen nanotiede on kansainvälisesti arvostettua tuotettujen julkaisujen vaikuttavuuden perusteella. Tutkimuksen korkea taso on huomioitu kansallisessa huippuyksikköpolitiikassa (COMP ja CMS). Huippuyksikköjen lisäksi laskennallisen nanotieteen keihäänkärkiä löytyy Jyväskylän NSC:stä sekä yliopistojen välisistä yhteistyöprojekteista. Tutkimuksen keihäänkärkinä voidaan pitää muun muassa hiilinanoputkien kaltaisiin yhdisteryhmiin liittyvää ominaisuuksien ennustamista ja nanoteknologista soveltamista, pinta- ja rajapintailmiöiden mallintamista, nanokomponenttien kvantti- ja monihiukkasilmiöitä, nanokatalyysejä, nanohiukkasten kasvun hallintaan liittyvää problematiikkaa sekä nanomittakaavan biologista fysiikkaa.

Laskennallinen nanotiede vaatii ajanmukaisen infrastruktuurin, johon kuuluvat tehokkaat tietoverkot, tietokonelaitteistot ja ohjelmistot sekä tutkijoille suunnattujen palvelujen tuottaminen ja kehittäminen. Kansallisen tietoteknisen infrastruktuurin varaan voidaan rakentaa ja vahvistaa nanotieteen ja nanoteknologian korkeatasoista infrastruktuuria. Korkeakouluilla ja tutkimuslaitoksilla on lähi-infrastruktuuri ja Funetin kautta yhteydet muihin koti- ja ulkomaisiin yliopistoihin ja tutkijoihin.

Korkeakoulujen, tutkimuslaitosten ja yritysten yhteisestä tietoteknisestä infrastruktuurista (mm. Funet, superlaskenta, gridit, kansainvälinen yhteistyö) ja tietoteknisistä palveluista (mm. ohjelmistot, tietokannat, käyttäjäystävälliset arkkitehtuurit, asiantuntijapalvelut ja koulutus) vastaa tieteen tietotekniikan keskus CSC.²³ Materiaalitieteillä on oma kansallinen verkosto, grid-infrastruktuuri (M-grid), joka mahdollistaa myös töiden rinnakkaisajon. CSC:n hallinnoiman IBMSC-superkoneen rahoitukseen oli varattu vuonna 1999 noin 5 miljoonaa euroa (30 miljoonaa markkaa). IBMSC-supertietokoneen kapasiteetista käytetään nykyisin noin 50 % laskennallisen nanotieteen projekteihin. Laitteistoa ei hankittu nimenomaan nanotieteille, mutta tämän alueen projektit ovat pystyneet parhaiten hyödyntämään konetta. Superkoneen lisäksi opetusministeriö on tehnyt pienempiä investointeja laskentainfrastruktuuriin, esimerkkinä Linux-klusterikapasiteetti. Valtion vuoden 2006 talousarvioesitykseen sisältyy 10 miljoonan euron tilausvaltuutus vuosille 2007–2009 uuden superkoneen hankintaa varten.

Superkoneen hankinnassa on varauduttava siihen, että laitekanta mahdollistaa satoja tai jopa tuhansia prosessoreja tarvitsevien simulaatioajojen tehokkaan läpiviemisen. Se edellyttää huippunopeaa kytkentää prosessorien välillä sekä ohjelmistojen optimoimista ja rinnakkais-

²³ Haataja, J. (2005). Views on IT infrastructure for nanoscale research from the Finnish perspective. CSC. Jacobsen, K. W. (2005). Prospects and Challenges for CSC within the Nanosciences. CAMP. Technical University of Denmark.

tamista huipputehon saavuttamiseksi. Superkoneella ratkotaan vuosittain muutamia erikseen valittuja Grand Challenge -projekteja, joiden toteuttaminen edellyttää hankevetoista yhteistyötä tutkimusryhmien ja CSC:n välillä.

Huippulaskenta vaatii panostusta myös osaamiseen, kuten nuorten tutkijoiden koulutukseen, menetelmien kehittämiseen ja ohjelmistojen optimointiin.²⁴ Tästä esimerkkinä Tekesin rahoittama FinHPC-projekti pyrkii tehostamaan suomalaisten tutkijoiden käyttämiä laskentakoodoja. Tekesin rahoittamassa MIKA-projektissa puolestaan kehitetään laskennallisen nanotutkimuksen ohjelmistoa kansallisena ja kansainvälisenä yhteistyönä.

Nanotieteen tutkimuksessa tarvitaan myös laadukkaita ohjelmistoja. Esimerkiksi Accelrysin ohjelmistot ovat aktiivisessa käytössä. CSC:hen on palkattu yksi tutkija nanotieteen tutkimuksen tukemiseksi. CSC:n nanotieteelle tarjoamat palvelut niihin suoraan liittyvine investointeineen ovat miljoona euroa vuodessa. Arvioon on laskettu investoinnit laskentapalveluihin, ohjelmistokustannukset, ylläpitotehtävät ja asiantuntijapalvelut. Muu infrastruktuuri (esim. Funet-verkko) sekä yleinen palveluinfrastruktuuri on jätetty pois arviosta. Arviointia vaikeuttaa se, että nanotiede luokiteltiin omaksi tutkimusalueekseen vasta 2004. Infrastruktuuriohjelmasta 2004 saatiin tukea nanotieteen kansalliseen ja paikalliseen infrastruktuuriin. M-grid-konsortiossa investoitiin klusterijärjestelmiin. Mukana on seitsemän organisaatiota. CSC hoiti tarjouskilpailun ja auttoi järjestelmien käyttöönotossa. Arviolta 60–80 % M-gridin käytöstä on laskennallista nanotiedettä. Kustannuksia tulee paitsi klusterin hankinnasta myös laitteistojen ylläpitämisestä paikallisella tasolla sekä CSC:n tuesta paikalliselle tasolle.

Nanotieteen tutkimus nojaa aiempiin tutkimusmenetelmiin. Siirtyminen makro- ja mikromaailman ilmiöistä nanomaailman ilmiöihin edellyttää uudenlaisten laskentamenetelmien ja -mallien kehittämistä. Siirtyminen yksittäisten molekyylien ja kiteiden analysoimisesta entsyymien ja elävien solujen mallintamiseen on seuraava suuri haaste.

CSC:n korkeakoulujen ja muiden eurooppalaisten tieteellisten laskentakeskusten kanssa aloittama työ luo hyvän pohjan nanotieteen ja -teknologian tarvitseman tietoteknisen infrastruktuurin rakentamiselle ja entistä tehokkaampien algoritmien, koodien ja ohjelmistojen kehittäiselle. Laskennallisen tutkimuksen merkitys nanotieteissä (mallinnus, simulointi, visualisointi) edellyttää korkeatasoisen tietoteknisen osaamisen ja infrastruktuurin ylläpitämistä myös korkeakoulujen ja tutkimuslaitosten lähiympäristössä. Yhteistyöhön tulisi kannustaa esimerkiksi kehittämällä M-gridin kaltaisia toimintamalleja tietoteknisten järjestelmien hankinnassa, käyttöönotossa ja ylläpidossa. Yhteydet Funetin kautta muihin koti- ja ulkomaisiin yliopistoihin ja tutkijoihin ovat välttämättömiä korkeakouluille ja tutkimuslaitoksille.

4.1.6 Tutkimuksen ja tutkimusympäristöjen sekä koulutuksen rahoitus

Nanotieteen tutkimuksessa tarvitaan kalliita ja yleensä hyvin monipuolisia tutkimuslaitteita. Samoja tai samantapaisia tutkimuslaitteita käytetään usein myös käytettäessä nanotieteen ja nanoteknologian tutkimusmenetelmiä monien muiden alojen tutkimuksessa, mm. biotieteissä, lääketieteessä, ympäristöteknologiassa, kemiassa, fysiikassa, jne. Nämä yhdessä ovat luoneet paineita uusien tutkimusympäristöjen varustamiseen.

²⁴ Computational Science: Ensuring America's Competitiveness. President's Information Technology Advisory Committee. June 2005. www.nitrd.gov/pitac/reports/20050609_computational/computational.pdf

Suomeen on rakennettu viime vuosina useita uusia nanotieteen ja nanoteknologian tutkimuskeskuksia, puhdastiloja ja laboratorioita: pääkaupunkiseudulle Micronova (TKK:n ja VTT:n yhteinen nano- ja mikroteknologian tutkimuskeskus), Jyväskylään NSC, Ouluun mikro- ja nanoteknologian keskus ja Tampereelle ORC. Opetusministeriö on rahoittanut tilojen varustamista. Vuositasolla yksin em. keskuksissa lähes 10 miljoonaan euroon nousevia nanotieteen ja nanoteknologian tutkimuslaitehankintoja ovat rahoittaneet mm. yliopistot, EU (EAKR), Suomen Akatemia (mm. infrarahoitus vuonna 2004), opetusministeriö, yritykset ja lähiseutujen kunnat. Jos otetaan huomioon nanoteknologiaa tutkimuksessaan soveltavat alat, niin tutkimuslaitteiden vuotuiset hankintakustannukset nousevat 15 miljoonaan euroon²⁵. Tutkimuksen rahoituksessa on otettava lisäksi huomioon tutkimuslaitteiden käyttö- ja ylläpitokustannukset, noin 20 % laitteiden hankintakustannuksista.

Nanotieteen ja nanoteknologian tutkimuksen pääasialliset rahoittajat ovat opetusministeriö ja yliopistot (budjettiensa kautta), Suomen Akatemia, Tekes, EU ja yritykset. Tekes on jo päättänyt nanoteknologiaan lähivuosina kohdistamastaan t&k-rahoituksesta (70 miljoonaa euroa). Suomen Akatemia on päättänyt käynnistää nanotieteen tutkimusohjelman (FinNano). EU:n tutkimuksen 7. puiteohjelman rahoituksesta päätettäneen vuonna 2006. Myös yliopistojen odotetaan profiloituvan ja tekevän osaltaan päätöksiä nanotieteen tutkimuksen ja koulutuksen rahoittamisesta. Näiden toimien voidaan hyvällä syyllä odottaa indusoivan suomalaisia yrityksiä lisäämään huomattavasti t&k-panostuksia nanotieteeseen ja nanoteknologiaan.

4.2 Nanotieteen ja nanoteknologian koulutus Suomessa

4.2.1 Tutkijankoulutus ja täydennyskoulutus

Nanotieteen ja nanoteknologian tohtorikoulutus tapahtuu tutkimuslaitosten yhteisissä tutkijakouluissa²⁶, Tekesin, EU:n ja Suomen Akatemian projekteissa. Väitöskirja tehdään yhä useammin nanotieteen poikkitieteellisissä tutkimusprojekteissa, joissa voi olla useita osallistujia Suomesta ja ulkomailta.

Pääkaupunkiseudun neljän kampuksen liittouma – Helsingin yliopiston kampukset Viikissä, Kumpulassa ja Meilahdessa sekä Teknillinen korkeakoulu ja VTT Otaniemessä – muodostaa kokonaisuuden kansallisessa nanotieteen tutkijakoulussa. Kampusten yhteistyön kautta pääkaupunkiseudulle on rakennettu poikkitieteellinen, erityisalat laajasti yhdistävä tutkimus- ja opetuskokonaisuus nanotieteessä. Yhteistyö mahdollistaa myös yhtenäisen opetusohjelman järjestämisen tutkijakoulun opiskelijoille; kaikki nanotieteestä kiinnostuneet opiskelijat osallistuvat todelliseen poikkitieteelliseen fysiikan, kemian, biotieteiden ja niihin liittyvien teknillisten tieteiden alat kattavaan opetukseen. Tutkijakoulun kurssimuotoinen opetus muodostuu kolmentyyppisistä kursseista: 1) tutkijakoulua varten luoduista, kaikille tieteenaloille suunnatuista säännöllisesti luennoitavista nanotieteen erikoiskursseista, 2) pääasiassa ulkomaisten luennoitsijoiden pitämistä intensiivikursseista ajankohtaisilla alueilla ja 3) normaaleista syventävistä ja jatko-opintokursseista, jotka palvelevat nanotieteen tutkimus-

²⁵ Nanoteknologian tutkimusmenetelmillä ja -laitteilla on nanoteknologian mahdollistavan luonteen vuoksi laajat sovellusmahdollisuudet myös monien muiden alojen tutkimuksessa, mikä aiheuttaa paineita uusien tutkimuslaitteiden rahoittamiseen. Tätä ongelmaa korostaa se, ettei Suomessa ole tutkimushankkeiden kokonaisrahoitusjärjestelmää, joka ottaisi huomioon suurten tutkimushankkeiden tutkimuslaitetarpeet.

²⁶ Valtakunnallinen nanotieteen tutkijakoulu (JY, HY, TKK, ÅA, TTY, VTT, MIKES) aloittaa toimintansa 2006. Tutkijakoulussa on yhteensä 14 tutkijaopiskelijapaikkaa.

ohjelmaa. Asiantuntevan opetuksen aikaansaamiseksi kategorian 1 kursseilla on useita luennoitsijoita. Pohjan opetuksen kehittämiseksi antaa syksyllä 2005 käynnistynyt 11 ov kurssikokonaisuus "Nanoscience I–IV". Luennoitsijoina on runsaat 30 nanotieteen suomalaista huippuosaajaa. Myös muissa valtakunnallisissa tutkijakouluissa, kuten Epäorgaanisen materiaalikemian tutkijakoulussa, Materiaalifysiikan tutkijankoulussa ja Orgaanisen kemian tutkijakoulussa on monia nanotieteen tutkimusohjelmaa palvelevia opintokokonaisuuksia. Viimeksi mainitussa on myös Jyväskylän yliopisto mukana.

Nanoaiheisia jatkokoulutuskursseja (4–5 kurssia vuosittain) on järjestetty systemaattisesti vuodesta 2002 Jyväskylän kansainvälisessä kesäkoulussa. Kesäkoulun intensiivikursseilla jatko-opiskelijoille tarjotaan nanotieteen ja nanoteknologian uusinta osaamista Suomesta ja ulkomailta yliopistoista, joiden kanssa alan tutkijat tekevät tutkimusyhteistyötä. Suomalaisten yliopistojen ja korkeakoulujen lisäksi opiskelijoita kursseille tulee yhteistyöyliopistoista ja Itä-Euroopasta.

Jyväskylän yliopisto koordinoi yhdessä pääkaupunkiseudun kanssa kansallista Nanotieteen tutkijakoulua, ja Teknillinen korkeakoulu kansallista materiaalfysiikan tutkijakoulua sekä GETA-tutkijakoulua. Joensuun yliopisto koordinoi kansallista modernin optiikan ja fotonikan tutkijakoulua. Jyväskylän yliopistolla, Teknillisellä korkeakoululla, Helsingin yliopistolla ja nanofotonikka -konsortion yliopistoilla on paikkoja näissä tutkijakouluissa, samoin Turun yliopistolla ja Åbo Akademilla. Monilla muillakin tutkijakouluilla on yhtymäkohtia nanoteknologiaan.

Optoelektroniikan keskus (ORC) järjestää joka toinen vuosi kansainvälisen kesäkoulun fotonikasta²⁷ ja Joensuun yliopisto järjesti kaksi kurssia 2005²⁸. TTY:n kemian laitos johti Suomen ensimmäistä nanotieteen tutkijakoulua. Koulutuksen kehittämiseksi perustettiin LCC Finland, joka myös palvelee ja kouluttaa teollisuuden työntekijöitä 2004–2007 Pirkanmaan TE-keskuksen, EU-rakennerahaston ja yritysten yhteisessä palvelu- ja koulutushankkeessa. Teollisuuden koulutuksesta vastaa Hermia. Konsortioon kuuluvat yliopistot järjestävät lisäksi alan kursseja ja seminaareja pitkin vuotta.

OPME toimii aktiivisesti Infotech Oulu -tutkijakoulussa ja järjestää vuosittain kesäkoulun (2005 viidennen kerran)²⁹. Lisäksi se osallistuu Luulajan teknillisen yliopiston ja Oulun yliopiston yhteiseen PhD-plis -tutkijakouluun.

Tutkijoiden osallistumisella kansainvälisiin EU:n tutkimuksen puiteohjelman tutkimushankkeisiin ja verkostoihin on koulutuksellisesti suomalaisen teknologisen osaamisen ja kansainvälisen näkyvyyden kannalta suuri merkitys. Lisäksi puiteohjelman tutkijankoulutuksen ja -liikkuvuuden rahoituksella on mahdollista kehittää kansainvälistä tutkijankoulutusta.

VTT tarjoaa mahdollisuuden opinnäytteen kokeellisen osan suorittamiseen projektiluonteisesti jo perustutkintovaiheessa. Lisensiaatin tai tohtorin tutkintoon tarvittavan kokeellisen osan suorittaminen kokonaan tai osittain VTT:ssä on mahdollista joko tutkimusprojekteissa tai opetusministeriön tutkijakoulurahoituksella. Suomen Akatemian post doc -rahoituksella syvennetään entisestään työskentelyä teollisuuden kanssa tieteellisesti haastavissa projekteissa. Yliopistot, instituutit ja yritykset voivat lähettää työntekijänsä VTT:een oppimaan tekniikoita ja arvioimaan niiden käyttökelpoisuutta omassa tutkimuksessa ja tuotekehityksessä. VTT:ssä työskentelevät tutkijat luennoivat seminaari- ja luentosarjoissa yliopistoissa ja korkeakouluissa. Eräissä tapauksissa (esim. TKK ja VTT) tutkijoita on ollut puoliksi yliopiston ja puoliksi VTT:n rahoittamina tiedonkulun edistämiseksi.

²⁷ Kolmas kansainvälinen kesäkoulu "New Frontiers in Optical Technologies" järjestettiin elokuussa 2005 Tampereella.

²⁸ Kurssit "Modern Optical Design" ja "MEMS, NEMS and Optical Microsystems".

²⁹ Kesäkoulu "Infotech Oulu Workshop on Optoelectronic Devices and Instrumentation".

Yliopistot ja konsortiot ovat järjestäneet nanotieteen ja nanoteknologian tutkijankoulutusta mm. eri alojen tutkija- ja kesäkouluissa. Nanotieteen ja -tekniikan poikkitieteellinen tutkijankoulutus on laajenemassa ja syvenemässä vähitellen. Tätä kehitystä tulee vahvistaa lisäämällä biotieteiden ja eksaktien luonnontieteiden poikkitieteellistä koulutusta kandidaatti- ja maisterivaiheessa. Valtakunnallisen nanotieteen ja muiden nanotieteeseen ja nanoteknologiaan liittyvien tutkijakoulujen toimintaa laajentamalla alan poikkitieteellisen tutkijankoulutuksen määrää voidaan lisätä joustavasti. Kansainvälisten kesäkoulujen toimintaa ja ulkomaisten yhteistyöyliopistojen kanssa tehtävää tutkijanvaihtoa kehittämällä tutkijankoulutusta on mahdollista suunnata tehokkaasti uusille tieteellisesti ja teknologisesti kiinnostaville nanotieteen ja nanoteknologian aloille.

4.2.2 Kandidaatti-, maisteri- ja ammattikorkeakoulutus

Maisteritason koulutusta järjestetään nanotieteessä Helsingin yliopistossa, Jyväskylän yliopistossa, Tampereen teknillisessä yliopistossa ja Teknillisessä korkeakoulussa.

Pääkaupunkiseudun yliopistot tarjoavat nanoteknologiaan ja -tieteisiin liittyvää opetusta eri aineiden yhteydessä. Tavoitteena on integroida osa opetuksesta monitieteisiksi kokonaisuuksiksi. Tässä suhteessa merkittävä avaus on yliopistojen syksyllä 2005 aloittama kurssikonaisuus "Nanoscience I–IV". Tämän yhteisen nanotieteen koulutuksen tarkoituksena on kehittää opiskelijoille monitieteisen lähestymistavan edellyttämät perustiedot nanotieteestä. Yhteistä koulutusta on tarkoitus laajentaa edelleen syventävien kurssien suuntaan. Opetusta on suunnattu myös ulkomaisille opiskelijoille, esimerkiksi TKK:n kansainvälisellä maisteriohjelmalla Master's Programme in Micro- and Nanotechnology.

Jyväskylän yliopistossa nanotieteen maisterivaiheen opiskelijoilla on kaksi yhteistä kurssia: nanotieteen perusteet ja nanotieteen seminaari. Fysiikan, kemian ja biologian syventävissä opinnoissa on useita nanotieteisiin liittyviä kursseja. Kansainvälisessä kesäkoulussa järjestetään vuosittain 4–5 nanotieteen intensiivikurssia nanotieteen ja -tekniikan eri aloilta. Kurssit on suunniteltu fysiikan, kemian ja biologian syventävän vaiheen opiskelijoille sopiviksi. Kurseilla käytetään koti- ja ulkomaisia luennoitsijoita.

JY:n nanotieteen kansainväliseen kaksivuotiseen maisteriohjelmaan otetaan bachelor- tai vastaavan tutkinnon biologian, fysiikan tai kemian alalla suorittaneita. Opiskelijoiden edellytetään opiskelevan maisterivaiheessa vähintään kahta edellä mainituista aloista (pääaineena ja sivuaineena) ja laajentavan tietopohjaansa oman alansa ulkopuolelle. Tutkielmat ovat poikkitieteellisiä ja ohjaajat kahdelta eri alalta. Maisterivaiheen koulutus antaa hyvän pohjan poikkitieteellisille jatko-opinnoille tai toiminnalle nanoteknologiaa soveltavissa yrityksissä. Parhaat kansainvälisen maisteriohjelman opiskelijat jäävät valmistuttuaan jatko-opiskelijoiksi, joten ohjelma toimii myös lahjakkuuksien rekrytointikanavana ulkomailta. Yhteisten nanotieteeseen ja -tekniikkaan liittyvien kurssien määrää lisätään vähitellen, samoin innovaatio- ja yritystoimintaan liittyvien kurssien tarjontaa yhdessä taloustieteellisen tiedekunnan kanssa. Nanotieteen kurssit ovat avoimia tiedekunnan kaikille opiskelijoille.

Nanofotoniikan maisteri- ja tohtorikoulutus korostaa teoria- ja laboratorio-opintoja. Käytännön töiden ja alan kirjallisuuden tuntemus on todettu tehokkaimmaksi koulutuksen yhdistelmäksi (tavanomaisia oppikursseja unohtamatta). Nanofotoniikkakonsortio antaa suuren painoarvon harjoittelulle, erikoistoille ja teoreettis-kokeellisille opinnäytetöille. Harjoitteluun tulisi liittyä nykyistä paljon enemmän yhteistyötä elinkeinoelämän kanssa, mikä voidaan toteuttaa esimerkiksi yliopistoyksiköiden ja teollisuuden yhteisillä tutkimusprojekteilla.

Kansainvälisesti katsoen Suomessa on vielä vähän nanotieteeseen ja nanoteknologiaan liittyvää kandidaatti- ja maisteritason koulutusta, esimerkiksi nanotieteitä laaja-alaisesti käsitteleviä kursseja (paitsi Nanoscience I–IV Helsingin seudulla) tai monitieteisiä maisteriohjelmia. Poikkitieteellisen koulutuksen ongelma on muiden luonnontieteiden koulutuksesta eriytnyt biotieteiden koulutus. Vahvuutena on opiskelijoiden kauttaaltaan hyvä taso ja yleinen kiinnostus luonnontieteisiin sekä koulutuksen läheinen yhteys tutkimukseen. Nanotieteen ja nanoteknologian teknologiansiirron ja yritystoiminnan kannalta puutteena voidaan pitää sitä, ettei koulutukseen sisälly riittävästi teknologialiiketoiminnan koulutusta ja valmennusta.

Ammattikorkeakouluille kesällä 2005 suunnatun kyselyn mukaan nanoteknologiaa käsitellään jossain määrin tekniikan alan koulutusohjelmissa, mm. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulussa (koulutusta tuotantoelektroniikan ja mikroelektroniikassa), Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulussa (koulutusta kemiassa, materiaalitekniikassa sekä puuteollisuuden pintakäsittelyssä) ja Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulussa (muovitekniikan, muovituotteiden valmistuksen ja optiikan sovelluksien koulutusta). Lisäksi joillakin ammattikorkeakouluilla on suunnitteilla nanoteknologian sovelluksiin liittyviä tutkimus- ja koulutushankkeita. Varsinaisia nanoteknologian koulutusohjelmia ei ole yhdessäkään ammattikorkeakoulussa. Vilkastunut t&k-toiminta ja ylemmät ammattikorkeakoulututkinnot antavat hyvät mahdollisuudet kehittää elinkeinotoimintaa tukevaa nanoteknologian koulutusta.

4.3 Nanoteknologian yhteydet muihin teknologioihin

Nanoteknologia on mahdollistava teknologia, joka vaikuttaa suuresti, jopa ratkaisevasti muiden teknologioiden ja alojen kehitykseen ja tulevaisuuden näkymiin. Tämä on nähtävissä mm. nanoteknologiaan liittyvien patenttien lukumäärän huikeasta kasvusta monilla keskeisillä teknologiateollisuuden aloilla viiden viimeisen vuoden aikana. Seuraavassa tarkastellaan lyhyesti nanoteknologian yhteyksiä ja ennakoitavia vaikutuksia muihin Suomen elinkeinon elämän kannalta keskeisiin teknologioihin.

4.3.1 Informaatioteknologia ja elektroniikka

Informaatioteknologia on globaali tutkimus- ja tuotantoala, jossa uusimpien ja tehokkaimpien integroitujen piirien ja lähetin- ja vastaanotinlaitteiden valmistus on maailmanlaajuisesti keskittymässä suurille yhtiöille. Tässä kehityksessä on suuri tarve nanoelektroniikan pitkäjänteiselle tutkimukselle ja tuotekehitykselle. Päämääränä on komponenttien pienempi tehonkulutus, suuremmat muistit, langattomat sovellutukset, henkilökohtaiset "digitaaliset assistentit" (PDA), läsnä-äly ja tähän tarvittavat anturit.

Mikroelektroniikan massavalmistuksessa päästiin 2004 alle sadan nanometrin rajan. Kaupalliset mikropiirit lähestyvät varsinaisia nanoelektroniikan komponentteja, joita on valmistettu pitkään tutkimuslaboratorioissa. Elektroniikan miniatyrisoinnin edut ovat korkea pakkaustiheys, nopeus ja edullisuus. Nanometrien mittakaavassa kvanttiefektit astuvat uudella tavalla kuvaan, ja niitä voidaan joko hyödyntää (kvantti-informaatio) tai pyrkiä eliminomaan niiden mahdollinen haittavaikutus, jos informaation prosessointiin käytetään normaalia binäärilogiikkaa.

Mikropiirien valmistuksessa käytettäneen UV-litografiaa ainakin 2009 asti, jolloin käytössä on 32 nanometrin teknologia. Tämän jälkeen esimerkiksi Intel siirtyy käyttämään EUV-

litografiaa. Tätä seuraavien valotinsukupolvien kustannukset nousevat niin korkeiksi, yli 20 miljoonaa euroa laitetta kohden, että alan teollisuus on alkanut etsiä uusia ratkaisuja piirien kuviointiin. Yhtenä vakavasti otettavana vaihtoehtona pidetään nanoimprinting-litografiaa, jota on kehitetty myös Suomessa usean vuoden ajan. Pidemmällä tähtäyksellä molekyyli-elektroniikan uskotaan pystyvän hyödyntämään bottom-up -menetelmiin perustuvia valmistustekniikoita.

Nanoteknologian odotetaan ratkaisevan komponenttien yhä suuremman pakkaustiheyden asettamat haasteet ja tuottavan entistäkin nopeampia ja edullisempia integroituja piirejä. Tämän kehityksen seuraaminen ja hyödyntäminen on tärkeää suomalaisista yrityksistä erityisesti Nokialle ja sen alihankkijoille. Myös painatukseen tai nestesuihkuun perustuvat elektroniikkapiirien uudet valmistusmenetelmät, joissa hyödynnetään monodispersiivisiä metallinanohiukkasia, ovat kiinnostavia.

Toinen tärkeä IT-sovellus on älykkäät nanoanturit, jotka monitoroivat ympäristöä, prosesseja, ihmistä jne. Nanokokonsa vuoksi ne kuluttavat vähän energiaa – pystyvät kenties ottamaan energian ympäristöstään, esimerkiksi lämpönä – ja niitä voidaan asentaa kaikkialle. Langattomuus eli nanoanturien ja rf-piirien integroiminen on oleellista tätä ajatellen. Prosessien jatkuva ja älykäs monitorointi ja ohjaus lisäävät tehokkuutta ja säästävät resursseja, millä on suora vaikutus energiankulutukseen ja ympäristön tilaan. Suomessa esimerkiksi Vaisala Oyj ja Suunto Oy ovat menestyksekkäästi soveltaneet MEMS-teknologiaa tuotteissaan hyvin aikaisessa vaiheessa. Nämä yritykset sekä lisäksi Nokia Oyj, paperiteollisuuden ja prosessiteollisuuden yritykset voivat hyötyä myös nanosensoriteknologian kehityksestä.

IT-sovelluksissa tarvittavien nanomateriaaleja valmistaa aktiivisia optisia kuituja nanohiukkasia hyödyntämällä Liekki Oy.

4.3.2 Paperinvalmistusteknologia sekä paperi- ja pakkausteollisuus

Suomalaisella nopeasti kansainvälistyneellä kuitupohjaisella paperi- ja pakkausteollisuudella on selkeitä vahvuuksia, erityisesti teknologinen kilpailukyky, eli tehdyt teknologiainvestoinnit, erinomainen teknologiaosaaminen ja kyky soveltaa teknologiaa tuotannossa ja tuotteissa.

Paperinvalmistusprosessin tärkeimpiä tavoitteita on hyvä tuottavuus ja tuotteiden korkea laatu. Nanoteknologialla on merkitystä erityisesti paperikoneen määrässä päässä. Biofilmimuodostusta estetään metallipintojen hallinnalla ja häiriöaineiden muodostumista pintakemian hallinnalla.

Paperinvalmistuksen päällystysteknologia toimii vielä makroskaalassa ja tulevaisuuden räätälöidyimmät teknologiat voivat ulottua mikroskalaan. Kuitujen pintojen ja erilaisten pigmenttien pintojen ominaisuuksien hallinnassa nanoteknologia voi tarjota mahdollisuuksia varsinkin jos kyseessä on kalliimpien lisäaineiden käyttötarve. Pintakemian ymmärrys auttaa erilaisten pintailmiöiden hallinnassa.

Paperi- ja IT-klusteri ovat kehittyneet erillään. Informaatioteknologia ja siihen liittyvä näyttöpääteteknologia on koettu uhkaksi perinteiselle, paperipohjaiselle viestinnälle. Ennakoluulottomalla kehitystoiminnalla on löydettävissä uusia kasvualueita paperipohjaisille tuotteille, jotka todennäköisesti löytyvät paperi- ja IT-maailman leikkauspinnoilla (esim. painettava elektroniikka, joka voi olla nanotekniikka, jos musteissa käytetään nanokokoisia osasia, joilla saadaan uusia ominaisuuksia perinteisen painettavan elektroniikan lisäksi). Nanoteknologialle ennustetaan tällä alueella runsaasti sovelluksia ja suurta merkitystä.

4.3.3 Energiateknologia ja energiantuotanto

Suomen energiateollisuuteen kuuluu ydinvoima-, öljy-, maakaasu-, kivihiihi-, aurinko- ja tuulienergia sekä vesivoima ja biopolttoaineet. Energiateknologia on teknologisessa murroksessa halpojen hiilivety-pohjaisten polttoaineiden rajallisuuden ja kasvavan kulutuksen vuoksi. Eurooppa ja Japani suuntautuvat voimakkaasti uusiutuvien ja hajautettujen energiajärjestelmien kehittämiseen ja uusien teknologioiden luomiseen. Näistä esimerkkeinä mikrokokoiset CHP-järjestelmät, aurinkolämpökeräimet, aurinkokennot (pii- ja väriainekennot) sekä tuulivoiman (vuotuinen kasvu 30 %) hyödyntäminen. Suomessa tuulivoiman alalla toimii esimerkiksi Moventas Oyj (entinen Metso Drives Oyj).

Merkittävimpänä yksittäisenä teknologisenä kehittämiskohteena ovat polttokennot, joita suunnitellaan vety- ja maa- tai biokaasupohjaisen energiantuotannon välineiksi, tulevaisuuden liikenteen voimanlähteiksi (autot, laivat), yksittäisten kiinteistöjen ja jopa suurten voimalaitosten sähkön ja lämmön tuottajiksi. Sähkön tuoton hyötysuhde näissä laitteissa (sekä pienissä että suurissa) ylittää 50 % polttoaineen energiasisällöstä. Hajautettujen energiajärjestelmien odotetaan saavan jalansijaa tulevaisuudessa erityisesti kehitysmaissa, joissa asuu 2/3 maailman väestöstä.

Nanoteknologiapohjaiset uudet materiaalit voivat mahdollistaa hajautetun energiateknologian käyttösovelluksia. Näissä tarvitaan mm. nykyistä parempia korkeita lämpötiloja kestäviä (CHP) ja suurta mekaanista jännitystä kestäviä keveitä materiaaleja (tuulivoima). Nanoteknologia voi olla tärkeää polttokennojen ionikalvojen kehittämisessä sekä kennossa tapahtuvien toivottujen ja ei-toivottujen pintareaktioiden optimoinnissa. Vedyn paikallinen tuotanto asettaa haasteita uusille nanokoon innovaatioille, esimerkiksi veden hajottamiselle auringonvalon avulla, mutta myös perinteisen elektrolyysin hyötysuhteen parantamiseksi. Nanoteknologian avulla voi myös löytyä ratkaisu vedyn varastointiongelmien kulkuvälineissä. Pii- ja väriaineaurinkokennojen kehittäminen on jo pitkään perustunut osittain nanoteknologiaan, ja suoran aurinkosähkön hyödyntäminen kasvaa yli 30 % vuosivauhdilla. Mainituissa sovelluksissa materiaalin tai sen pinnan nanorakenne tuottaa toivotun ominaisuuden, vaikka materiaali käyttökohteessa onkin makroskooppista.

4.3.4 Biotekniikka, terveydenhuolto ja hyvinvointiteknologia

Terveydenhoidon ja hyvinvointiteknologian keskeinen periaate on tutkimuksen ja koulutuksen sekä yritystoiminnan kehittäminen ihmisen kokonaisvaltaisen hyvinvoinnin seurantaan ja edistämiseen. Terveiden ja sairauksien ymmärtäminen sekä liikunnan ja terveydenhoidon vaikutusten selvittäminen edellyttävät laaja-alaista ihmisen toiminnan mittaamista ja analyysiä, mikä vaatii monipuolista biologisten ja fysiologisten sekä kemiallisten ja fysikaalisten menetelmien käyttöä. Nanotiede voi tarjota tähän uusia mahdollisuuksia. Monet uusista tutkimusmenetelmistä tai -välineistä edellyttävät molekyyli- ja solutasoisten vuorovaikutusten ja ilmiöiden hallintaa ja entistä pienempien mittasysteemien kehittämistä. Nanoskaalan laitteet ja systeemit ovat siirtymässä mittajärjestelmien toiminnallisiksi osiksi, esimerkkeinä diagnostiset menetelmät ja laitteet.

Kemialliset tai biologiset nanopartikkelit voivat mahdollistaa uudenlaisten analyysi- ja hoitomenetelmien kehittämisen. Geeniterapia ja kohdennettu lääkehoito yleistyvät tulevaisuudessa. Nanotekniset sovellukset voivat tarjota uudenlaisia herkempiä, pitempikestoisia ja tarkempia mahdollisuuksia. Hoitomenetelmäkehityksessä tulevaisuuden älykkäät nanopartikkelit tarjoavat nykyistä tehokkaampia ja varmempia mahdollisuuksia kohdentaa lääkitys paikallisesti, ajallisesti ja määrällisesti. Samalla vähennetään lääkityksen sivuvaikutuksia.

Orion Diagnostica hyödyntää nanohiukkasreagensseihin perustuvaa nanoteknologiaa QuickRead-tuoteperheessä työllistäen 150–200 henkilöä Espoossa. Osaaminen perustuu 1980-luvulla Helsingin yliopistossa ja Teknillisessä korkeakoulussa tehtyyn tutkimustyöhön. Orion Diagnosticassa nanohiukkasteknologialla nähdään olevan vahva asema tulevaisuuden immunodiagnostiikassa sekä myös muilla biolääketieteen osa-alueilla. Suomeen on syntynyt useita pienempiä, nanoteknologiaa hyödyntäviä diagnostiikan ja lääkeannostelualan tutkimus- ja tuotekehityssintensiivisiä yrityksiä.

4.3.5 Ympäristöteknologia

Ympäristöteknologia voi tarjota mahdollisuuksia ympäristön tilan seurantaan ja ihmisen toiminnan haittavaikutusten vähentämiseen mm., kun pystytään kehittämään uusia puhdistusmenetelmiä ja päästöjä vähentäviä tuotantomenetelmiä. Nanoteknologia mahdollistaa ilman, veden ja maaperän tilan entistä luotettavamman monitoroinnin, mm. raskasmetalli-, molekyyli-, bakteeri- tai virusselektiivisesti.

Ympäristön puhdistaminen voi perustua nanopartikkelien adsorptioon sekä partikkelien avulla toteutettavaan kemialliseen tai biologiseen degradaatioon. Näistä tunnetuin on nanokiteisen titaanidioksidin itsepuhdistavat ja desinfioivat vaikutukset. Nanopartikkeleiden suuri pinta-ala massayksikköä kohden tarjoaa merkittävää adsorptiopotentiaalia, jolla voidaan merkittävästi parantaa esimerkiksi saostamistehokkuutta. Myös nanokokoisia epäpuhtauksiin kelatoituvia yhdisteitä on mahdollista valmistaa. Nanohuokoisia kalvoja voidaan käyttäen selektiivisesti toksisten aineiden poistamiseen ilmasta ja vedestä. Nanotiede voi tuoda perusymmärtämystä mm. nukleatioon ilmakehässä ja muissa aggregoituvissa molekyylijärjestelmissä. Ilmiö on keskeinen palamisen optimoinnissa.

Nanohiukkasuodatinteknologiaa ovat kaupallistamassa mm. Lifa Air ja Genano. Helsingissä toimiva Lifa Air tuottaa ratkaisuja ilmastointijärjestelmien puhdistamiseen ja rakennusten sisäilman parantamiseen uudella Lifa 3G NanoelectricUV-suodatustekniikalla, joka voitti Tuottava Idea-kilpailun 2003. Lifan suodatustekniikkaa hyödyntäen kyetään korkeaan suodatustehokkuuteen jopa nanoluokan pienhiukkasten ja kaasumaisten epäpuhtauksien suodattamisessa. Teknologian avulla kyetään suodattamaan mm. virukset ja bakteerit, joten se soveltuu erinomaisesti ilmaperäisesti leviäviltä taudeilta (SARS, lintuinfluenssa, ilmatartuntaiset sairaalainfektiot) suojautumiseen.

Nanoteknologia mahdollistaa uudet tuotantomenetelmät ja ympäristölle haitallisten valmistuskemikaalien korvaamisen, yksinkertaistaa prosesseja sekä vähentää energiankulutusta ja haitallisia sivutuotteita. Ongelmat ovat ratkaistavissa ja onnistuneessa sovelluksessa ympäristövaikutus on välitön. Keinoja ovat mm. nanopartikkeleihin perustuva katalyysi ja nanohuokosiin perustuva valikoiva suodatus. Nanoteknologiaa soveltava yritys tällä alalla on esimerkiksi EcoCat Oy.

4.3.6 Koneenrakennusteknologia

Suomi on johtavassa asemassa erällä koneenrakennuksen alueilla pitkäaikaisen ja systemaattisen tuotekehitystyön jälkeen. Tutkimuslaitosten ja teollisuusosapuolien yhteistyö on ollut hedelmällistä. Kansallisesti tärkeisiin kohteisiin keskittyneiden tutkimusten tulokset on saatu nopeasti liiketoiminnallisesti hyödynnettäviksi. Aktiivinen t&k-toiminta ja yhteistyö voivat turvata teollisuutemme kilpailukyvyn myös tulevaisuudessa.

Kone- ja prosessilaiteteknologiassa menestyminen vaatii erilaistumista. Nanoteknologia saattaa tarjota tähän mahdollisuuden mm. uusien nanopartikkelisaostettujen rakennemateri-

aalien kautta. Kulutusta entistä paremmin kestävät metalliset materiaalit, sitkeät keraamit, ja lämmönkestoltaan paremmat polymeerit ovat esimerkkejä nanomateriaalien suomista mahdollisuuksista.

Potentiaalisimpia sovellutuskohteita nanopartikkelimateriaaleille ovat pinnoitteet ja pinnoille räätälöidyt ominaisuudet. Likaantumisen, kitkan tai korroosion estämisellä tulee olemaan runsaasti teollisia sovellutuksia, jos kustannustaso on halvempi kuin korvaavissa ratkaisuissa.

Nanoteknologialla toteutetuilla sulautetulla älyllä tai miniatyyriantureilla uskotaan olevan sovellutuskohteita mm. prosessien tilan seurannassa ja prosessilaitteiden kunnonvalvonnassa.

Kokeellisen tutkimuksen lisäksi rakennemateriaalien kehitystyössä tarvitaan atomitasoinen tuntemista, jotta voidaan ymmärtää nanopartikkeleiden aikaansaamia ominaisuuksien muutoksia sekä nopeuttaa ja ennakoita materiaalikehitystä.

Maassamme on ainutlaatuinen osaaminen Atomic Layer Deposition – ohutkalvonkasvatusteknologiassa, joka juontaa juurensa 1970-luvulla aloitetusta kehitystyöstä. Keskeisessä asemassa on ALD -ohutkalvonkasvatuslaitteet ja niihin liittyen vuosien varrella hankittu tekninen osaaminen. Tätä nanoteknologian laiteosaamista ovat jo Planar, Picosun ja Beneq ryhtyneet menestyksellisesti kaupallistamaan.

4.3.7 Rakennusteknologia

Rakennusteollisuudessa käytetään paljon erilaisia materiaaleja. Materiaaliominaisuuksien pienetkin parannukset voivat tästä syystä luoda laajat markkinat. Nanotekniikan sovellusmahdollisuuksien moninaisuus rakennusteollisuudessa on vasta avautumassa. Nanoteknologiaa voidaan käyttää mm. tietyn rakennusosan tilan monitoroinnissa, esimerkkinä liitosten mekaanista kuntoa monitoroivat älykkäät liitokset. Elektrokromian tai läpinäkyvyydeltään tai väreiltään säätyviä pinnoitteita voidaan käyttää sähköturvallisuusindikaattoreissa sekä kosteuden ja turmeltumisen monitoroinnissa. Itsepuhdistuvasta ja huurtumattomasta lasista on jo kaupallisia tuotteita likaantumisen ja pilaantumisen havaitsemiseksi. Itsepuhdistuvien materiaalien kehitystyötä tehdään parhaillaan mm. maatalouden, sairaanhoidon ja suurkeittiöiden tarpeisiin.

Säätyviä, muotoaan lämpötilan, pH:n tai ionivahvuuden funktiona muuttavia polymeerejä voidaan käyttää erilaisissa rakennusteknisissä sovelluksissa, esimerkkeinä ilmastointilaitteet, kosteussulut ja virtausten säätimet. Nanoteknologiaa tarvitaan ennen muuta materiaalien reaktiivisuuden ja pintaominaisuuksien kehittämiseksi. Höyrynläpäisevyyden ja rakennusten sisäilmaston hallintaan nanokuiturakenteet tarjoavat investointi- ja käyttökuluiltaan edullista teknologiaa. Rakennusmateriaalien lujuutta ja säilyvyyttä voidaan kehittää modifioimalla huokoisuutta, huokosten pintaominaisuuksia ja mm. kuitujen tartuntaominaisuuksia. Tutkimustoimintaa on käynnissä erityisesti puun pinta- ja säilyvyysominaisuuksien parantamiseksi.

Rakennusteknisten sovellusten kehittämisen verkostossa on jo nyt kymmeniä yrityksiä. Tutkimustahoina mukana ovat mm. VTT, TKK, ÅA, HY, MTT ja TTY. VTT on valinnut säätyvistä materiaaleista tehtävien tuotteiden kehittämisen avainteknologiaksi, johon suunnataan merkittävä tutkimuspanos lähivuosina.

5 Nanoteknologian innovaatio- ja yritystoiminta Suomessa

Nanoteknologian teollisessa arvonlisäketjussa on kolme vaihetta: 1) Nanomateriaalit (mm. nanopartikkelit ja -putket, kvanttipisteet, fullereenit, dendrimeerit ja nanohuokoiset materiaalit), itsejärjestyvät materiaalit ts. nanomittaluokan rakennneosien valmistaminen; 2) Nanovälituotteiden (mm. pinnoitteet, kuidut, muistit, sirut ja piirit, näytöt, optiset komponentit, kudosta korvaavat materiaalit ja suprajohtavat langat) valmistaminen; sekä 3) Nanoteknologian käyttöön perustuvien lopputuotteiden (autot, lentokoneet, tietokoneet, kulutuselektroniikka, vaatteet, lääkkeet ja diagnostiikkatuotteet, funktionaaliset elintarvikkeet, aurinko- ja polttokennot jne.) valmistaminen³⁰. Nanoteknologian teollista kehitystä on edeltänyt nanomittaluokan ilmiöiden ja prosessien tutkimisen ja manipuloinnin mahdollistavien tutkimuslaitteiden (mm. AFM, STM, SNOM, sekä erilaiset elektronimikroskopiat) keksiminen ja sarjamittaisen valmistuksen käynnistyminen. Omana, neljäntenä ryhmänä voidaan lisätä nanoteknologian tarvitsemat t&k:n ja tuotannon erikoislaitteet. Tähän kategoriaan kuuluvat esimerkiksi yllämainitut ALD-laitteet.

Lux Researchin mukaan nanoteknologia tarjoaa parhaat liiketoimintamahdollisuudet nanovälituotteiden ja nanolaitteiden osa-alueilla. Toisaalta nähdään, että yhä harvemmillä yrityksillä on edellytyksiä toimia menestyksellisesti nanomateriaalien osa-alueella.

Nanoteknologiapatenttien määrä on kasvanut viime vuosina räjähdysmäisesti ja lasketaan tällä hetkellä jo kymmenissä tuhansissa. Keksintöjen määrä ylittää yksin Yhdysvalloissa 10 000 ja Japanissa yli 6 000 patenttiin. Suomessa nanoteknologian keksintöjä on suojattu vasta 39 patentilla³¹. Nanoteknologiaan perustuvien tuotteiden markkina-arvo oli 2004 noin 13 miljardia Yhdysvaltain dollaria, josta 1 % liittyi nanomateriaaleihin, 7 % nanovälituotteisiin (elektroniikka, IT, LEP) ja 92 % lopputuotteisiin (mm. autot ja lentokoneet). Väli- ja lopputuotemarkkinat laajenevat voimakkaasti lähivuosina. Sijoitetun pääoman tuotto-odotukset ovat maailmanlaajuisesti korkeat ketjun alkupäässä (nanomateriaalit ja nanovälituotteet), mutta niin ovat riskitkin.³²

³⁰ Nordan, M.M. (2005). Nanotechnology; Where Does the U.S. Stand? Luxresearch, June 29, 2005. Luc Research Inc.

³¹ VTT Tietopalvelun selvitys nanoteknologian keksinnöistä vuodesta 1990.

³² Nordan, M. M. (2005). Nanotechnology's Impact on Products: When, Where, and How Much? Luxresearch, April 26, 2005. Luc Research Inc.

5.1 Suomalaisten yritysten kiinnostukset ja panostukset nanoteknologiaan

Suomessa³³ on vakiintunutta nanoteknologian tai siihen liittyvää liiketoimintaa elektroniikka- ja optoelektroniikkateollisuudessa (mm. MBE-nanorakenteet, ALD-pinnoitteet, laserit, fotonikka ja sensorit) ja kemian teollisuudessa (mm. TiO₂-nanohiukkastuotanto, johtavat itsejärjestyneet polymeerit). Lisäksi diagnostiikkateollisuudessa (mm. bioaktiivisilla molekyyleillä pinnoitetut nanopartikkelit) on nanoteknologisia sovelluksia tuotantovaiheessa. Tutkimus- ja tuotantokehitysvaiheessa olevia nanoteknologiasovelluksia on kaikilla toimialoilla. Aktiivisia nanoteknologiayrityksiä on noin 60 ja työntekijöitä 300–500.

Elektroniikkateollisuuteen on syntynyt vahvoja tuotantoketjuja ja klustereita teknologiajohtajien, kuten Nokia, Vaisala, Suunto ja Polar Electro, ympärille. Yrityksiä kiinnostavat mm. nanosensorit, kehittyneet nanoteknologiaa hyödyntävät laser-teknologiat ja valokuidut, integroitu optiikka, painettava elektroniikka (joka voi eräissä tapauksissa olla nanoteknologiaa), molekyyli- ja nanoelektroniikka sekä uuden sukupolven massamuistilaitteiden kehittäminen ja integrointi mm. kulutuselektroniikkaan. Muutamat teknologiat ovat vakiintuneet elektroniikkateollisuuteen (mm. ALD-pinnoitteet, diffraktiivinen optiikka, nanoteknologiaa hyödyntävät laserit ja sensorit). Teknologiajohtajien aktiivisuus heijastuu koko tuotantoketjuun ja elektroniikkaklustereihin; tällä alalla on Suomessa eniten nanoteknologiasta kiinnostuneita ja siihen panostavia yrityksiä.

Komponenttien valmistusmenetelmien uusi sektori on *nanopainotekniikka*. Tieteellisesti se ei ole uutta, eikä sitä vielä käytetä teollisuudessa, mutta siitä arvellaan tulevan kustannustehokas massatuotantomenetelmä. Nanopainomenetelmää tutkitaan VTT:ssä Espoossa ja ORC:ssä Tampereen teknillisessä yliopistossa. VTT Tietotekniikka (Otaniemi) koordinoi EU:n tutkimuksen 6. puiteohjelman IP-hanketta Emerging Nanopatterning Technologies (NaPa), jonka kokonaisbudjetti on 31 miljoonaa euroa. Kehitystyö ORC:ssä on käynnistynyt Tekesin *FinNano*-teknologiaohjelman *Nanophotonics* -hankkeessa 2005. Uusia molekyyli-tason massamuistiratkaisuja tutkitaan Tekesin *FinNano*-teknologiaohjelmassa Jyväskylän yliopiston NSC/TKK:n hankkeessa *Molecular Scale Memory Elements* sekä VTT Espoo/Åbo Akademi/TKK:n hankkeessa *Nanoscale Memory Unit*, Micronovan *FinNano*-teknologiaohjelman *Aldus* -hankkeessa kehitetään suomalaisen ALD-tekniikan avulla uusia optisia nanopinnoitusratkaisuja. Micronovassa tutkitaan myös Tekesin ja alkavien yritysten rahoittamaa projektia, jossa tutkitaan nanotekniikan hyödyntämistä näkyvän valon ja UV-alueen emitterien valmistuksessa.

Kemianteollisuus on panostanut jo jonkin aikaa nanoteknologiaan. Asemansa vahvistaneen nanoteknologiaan liittyvän liiketoiminnan (mm. TiO₂-nanohiukkastuotanto, johtavat itsejärjestyneet polymeerit) lisäksi alan yrityksillä on mm. nanokatalyytteihin, -komposiitteihin, -partikkeleihin ja -entsyymeihin liittyvää tutkimus-, kehitys- ja liiketoimintaa. Kemian teollisuuden yritykset ovat kiinnostuneita uusista kromatografian, karakterisoinnin ja mallintamisen nanoteknologiaturkimusmenetelmistä. Myös *öljyteollisuus* (Fortum) on kiinnostunut ja panostanut sekä nanokatalyyttien käyttämiseen öljynjalostusprosesseissa että nanoteknologian uusiin tutkimusmenetelmiin. Kemian teollisuudelle nanoteknologia tarjoaa mahdollisuuksia sekä tuotantoprosessien ja tuotteiden parantamiseen että uusien tuotteiden tuottamiseen.

Metsäteollisuus on Suomessa vahva ja kehittynyt klusteri, jolla on monia yhtymäkohtia ja kerrannaisvaikutuksia myös muihin teollisuuden aloihin, kuten kemianteollisuuteen (paperi-

³³ Nanotechnology in Finnish Industry (2004). Final Report for Tekes. Spinverse Consulting Oy. Pekka Koponen, Jane Jutila.

kemikaalit), paperi- ja metsäkoneteollisuuteen sekä elektroniikkateollisuuteen (tuotannonohjaus, sensorit, uudet painettavan elektroniikan lukuteknologiat). Metsäteollisuudella on kehittyntä tutkimus- ja tuotekehitystoimintaa ja hyvin varustettuja laboratorioita. Metsäteollisuutta kiinnostaa mm. painettava elektroniikka ja paperinvalmistuksen tuotantoprosessien kehittäminen (mm. kestävät ja funktionaaliset pinnoitteet, märkää- ja paperikemikaalit). Uusien nanoteknologioiden kehittäminen ja soveltaminen metsäteollisuuden tuotantoprosesseissa on vasta alkuvaiheessa.

Suomen *lääketeollisuuden* ja biotekniikan toimijoista suuri osa on pieniä tai keskisuuria tuotekehitysyrityksiä. Osalla niistä on nanoteknologiaan liittyvää (mm. entsyymien, reagenssien yhdistäminen nanoratkaisuihin, biosensorit, eräät nanopinnoitteet ja täsmälääkkeet) tutkimus- ja tuotekehitystoimintaa ja liiketoimintaa. Biotekniikan ja *hyvinvointiteknologian* yrityksille nanoteknologia, vanheneva väestö ja hyvinvointipalvelujen kysyntä tarjoavat mahdollisuuksia pika- ja lähitestauksessa, terveyden ja elimistön tilan monitoroinnissa sekä lääkkeiden annostelussa. Lääketeollisuudessa ja biotekniikassa teknologiavetureiden puute hidastaa kehitystä ja kansainvälisille markkinoille pääsyä. *Diagnostiikkateollisuus* on vakiintuneempi toimiala, joka kansallisesti koordinoi ja ajaa alan etuja diagnostiikkaklusterin kautta. Kansainvälistä näkyvyyttä ja verkottumista biosovellusaloilla saavutetaan Suomen bioteollisuuden kautta. Sen jäsenenä on sekä lääke-, elintarvike-, diagnostiikka- että biotekniikkayrityksiä.

Metalliteollisuudessa nanoteknologiasovellukset ja -tutkimus sekä markkinat liittyvät pintakemiaan, kulutusta ja korroosiota kestäviin, kitkaa pienentäviin ja funktionaalisiin pinnoitteisiin ja korvaaviin keraamisiin komposiitteihin. Suomen metalliteollisuustuotteiden korkea jalostusaste erikoisaloilla, erinomainen osaaminen, kemian-, elektroniikka- ja metsäteollisuuden kanssa yhteiset klusterit ja kansainväliset markkinat luovat hyvät edellytykset nanoteknologian hyödyntämiselle metalliteollisuudessa. Tähän ryhmään kuuluu maamme nanoteknologian laitteiden erikoisosaaminen (etenkin Atomic Layer Deposition ja Direct Nanoparticle Deposition)

Fotoniikkateollisuus on uusi, lupaava teknologiassektori Suomessa. Tampereen seudulle on viimeisen kymmenen vuoden aikana luotu yli 150 uutta tuotannollisen teollisuuden työpaikkaa. Diodilasertuotannon rinnalle nousee kuitulasertuotanto vuosikymmenen lopulla, ja diffraktiivisen optiikan teollisuus kasvaa myönteisesti. Soft embossing -nanopainotekniikasta, joka on ORC:n lähiajan painopisteala, odotetaan täysin uutta keihäänkärkeä tutkimukseen ja tuotantoon 2007–2009.

5.2 Nanoteknologian tutkimus- ja tuotekehitystoiminta yrityksissä

Nanoteknologian tutkimusta ja tuotekehitystä tehdään kaikilla toimialoilla, selvästi eniten *elektroniikka- ja kemianteollisuudessa*. *Metsäteollisuudessa* on perinteisesti vahvan tutkimus- ja tuotekehitystoiminnan vuoksi runsaasti potentiaalia ja mielenkiintoa nanoteknologian uusiin sovelluksiin. *Metalliteollisuuden* perinteisesti vahvoilla ja korkean jalostusasteen aloilla panostetaan nanoteknologian tutkimukseen ja tuotekehitykseen, vahvojen omien tutkimuskeskitymien puuttuessa yhteistyössä korkeakoulujen ja ulkopuolisten tutkimuslaitosten (mm. VTT) kanssa.

Fotoniikka-alalle on syntynyt lyhyessä ajassa useita yrityksiä, mm. Coherent Finland, Modulight, Corelase, EpiCrystals, RefleKron, Cavitar, Oseir ja Dekati Tampereelle, Nanocomp Joensuuhun, Braggone Ouluun sekä Heptagon, Liekki, OptoGaN ja Lumilaser Helsingin seudulle. TTY-JoY-nanofotoniikkakonsortioilla, mukaan lukien OY:n joidenkin

yksiköiden toiminta, on arviolta 50–60 yrityksen kanssa yhteisprojekteja käynnissä 2005.

Lääketeollisuuden sekä biotekniikka- ja hyvinvointiteknologia-yritykset panostavat myös nanoteknologiaan. Diagnostikassa on syntynyt hyvää nanoteknologian osaamista (esim. Orion Diagnostica), jota edelleen kehitetään. Myös muilla biotekniikan aloilla tehdään nanoteknologiaan liittyvää t&k-kehitystyötä

Yritysten suurimmat nanoteknologiahaasteet liittyvät tutkimus- ja tuotekehitystoiminnan kalleuteen ja pitkään aikajänteeseen; tutkimusideoiden matka laboratoriosta tuotteiksi markkinoille on pitkä ja kallis. Nanoteknologia on tietointensiivistä, uusien teknologioiden tuottamiseksi ja soveltamiseksi tuotannossa tarvitaan monialaosaajia, monipuolisia tutkimuslaboratorioita, kalliita tutkimuslaitteita ja puhdastiloja; tutkimus-, kehitys- ja investointikustannukset ja riskit ovat suuret, ja sijoitettujen pääomien tuotto-odotukset vuosien päässä. Uudet yritykset kokevat nanoteknologian tutkimus- ja tuotekehitystoiminnan rahoitusmahdollisuudet haasteisiin nähden vaatimattomiksi, hajanaisiksi ja työläiksi.

5.3 Yritysten ja tutkimuslaitosten yhteistyö

ASM Microchemistry Oy on hyvä esimerkki menestyksellisestä tutkimuslaitoksen ja yrityksen pitkäaikaisesta t&k-yhteistyöstä. ASM Microchemistry Oy on ASM International N.V.:n (ASMI) tytäryhtiö. Mikroelektroniikkalaittevalmistaja ASMI:n pääkonttori on Alankomaissa. ASMI osti suomalaisen Mikrokemia Oy:n 1999 saadakseen ALD-teknologian tuotevalikoimaansa. Syntyneen ASM Microchemistry Oy:n (ASMM) rakenne muuttui 2000-luvulla: laitevalmistus ja -kehitys siirtyivät ASMI:n muihin yksiköihin Yhdysvaltoihin, Japaniin ja Singaporeen, ja Suomeen jäi 15 hengen tutkimus- ja asiakastukiorganisaatio. Uudelleen järjestelyn yhteydessä 2004 ASMM siirsi tutkimuslaboratorionsa Helsingin yliopiston kemian laitoksen tiloihin Kumpulaan. Yliopiston seitsemän ja ASMM:n seitsemän ALD-laitetta muodostavat Kumpulaan laitevalikoimaltaan ainutlaatuisen tutkimuskeskitymän.

Helsingin yliopisto ja ASM Microchemistry Oy solmivat 2004 viisivuotisen tutkimussopimuksen, jonka puitteissa kehitetään uusia materiaaleja ja ALD-prosesseja mikroelektronikkateollisuudelle. Tutkimustyö kohdistuu moniin materiaalityyppeihin, kuten metalleihin, metallinitrideihin ja dielektrimateriaaleihin, joita prosessoidaan ALD-menetelmällä ohutkalvoiksi. ASMM ja yliopiston ohutkalvoryhmä tekevät tutkimussopimuksen mukaisesti aktiivista tutkimusyhteistyötä, mutta kummallakin osapuolella on myös itsenäiset tutkimushankkeensa. Yhteistyön uskotaan mm. helpottavan kansainvälisiin tutkimushankkeisiin pääsyä. Uusi ALD-laitevalmistaja Picosun Oy ja Helsingin yliopiston Epäorgaanisen kemian laboratorio solmivat syyskuussa 2005 viisivuotisen tutkimussopimuksen, jossa Helsingin yliopisto kehittää ALD-prosesseja nanorakenteiden valmistamiseksi Picosunin tekemällä reaktorilla. Tutkimus keskittyy erityisesti huokoisten nanomateriaalien pinnoittamiseen ja pintojen muokkaamiseen. Micronovassa TKK:n tutkimusryhmillä on vastaavanlaista tutkimusyhteistyötä toisen kotimaisen ALD-reaktorivalmistajan Beneq Oy:n ja useiden ALD-kalvoja tuotteisiinsa soveltavien yritysten kanssa. Edellä mainitujen laitevalmistajien lisäksi Espoossa toimii myös Planar Systems, joka on käyttänyt ALD:tä elektroluminenssinäyttöjen teolliseen valmistukseen jo yli 20 vuoden ajan. Planarilla on myös merkittävää tilaustutkimuspalvelua. ALD-menetelmän ympärille syntynyttä osaamis- ja teollisuusklusteria voidaankin pitää lupaavana esimerkkinä nanoteknologian soveltamisesta perustutkimuksesta laitevalmistukseen ja tuotteisiin.

Helsingin yliopistossa on tehty nanoteknologiaan liittyvää tai sitä sivuavaa yhteistyötä useiden muiden yritysten kanssa (mm. CTT, Environics, Reagen, Silecs, Fluilogic, Chemtone, Labmaster, Dekati, Vaisala, Nokia, Genano, Lifa Air, Avantone, Asperation, Kemira, Andritz, M-Real, Stora-Enso, UPM-Kymmene, Motorola, Medtronic, Honeywell, Philips, Infineon, Silecs, Environics, Volatec, Labgas, Kibron, Icuris Pharma, Mobidiag).

Helsingin yliopiston nanoteknologiaan liittyvästä tutkimuksesta on syntynyt useita yrityksiä. Myös Orion Diagnostican nanohiukkasosaaminen perustuu Helsingin yliopistossa 1980-luvulla tehtyyn huippututkimukseen.

Otaniemessä sekä TKK että VTT tekevät laajasti nanoteknologiaan liittyvää yhteistyötä teollisuuden kanssa, esimerkkinä yritykset ABR Innova, Ahlstrom, Borealis, Dekati, Kemira, OMG Chemicals Kokkola, Neste Oil, Nokia, Vaisala, Labmaster, Liekki, Picosun, Planar, Ecocat, Outokumpu, Panipol, Kemira, Okmetic, VTI Technologies, OptoGaN, Lumilaser, Silecs, Oxford Instrument Analytical (ent. Metorex), Infineon Technologies, Stora-Enso, UPM, M-Real, Teknos-Winter, Environics, Rhodia, Nanogate, Oxonia, Orion Diagnostica. Otaniemen tutkimuslaboratoriot koordinoivat kuutta FinNano-teknologiaohjelman viidestä nanoteknologian tutkimushankkeista.

Jyväskylän NSC tekee yhteistyötä erityisesti informaatio- ja paperinvalmistusteknologian sekä ympäristö- ja energiatekniikan alueilla toimivien nanoteknologiaa hyödyntävien yritysten kanssa (mm. Nokia, Metso, Moventas, Planar, UPM-Kymmene, MetsäSerla, M-real, Vapo, Enermet, Fortum, Vaisala, Oxford Instruments Analytical, Biofellow, Immunodiagnostic, Nanoscale). Nämä ovat esimerkkejä yrityksistä, jotka ovat rahoittaneet NSC:n tutkimusprojekteja ja infrastruktuurin rakentamista. Yhteisiä t&k-projekteja rahoittaa mm. Tekes. Viimeaikaiset yhteistyöprojektit ovat johtaneet useisiin patenttihakemuksiin ja prototyyppeihin, jotka ovat siirtyneet tuotekehitykseen yrityksissä. NSC:n yhtenä keskeisenä tavoitteena on tukea myös uusia teknologiayrityksiä mm. tarjoamalla tutkimuslaitteita ja niihin liittyvää osaamista yritysten käytettäväksi. Tähän mennessä on syntynyt kolme uutta yritystä: Nanoway Oy, Nanolabsystems Oy ja Magnasense Oy.

Suomessa alkunsa saaneesta Atomic Layer Deposition (ALD) -ohutkalvokasvatusteknologiasta on tullut nanoteknologian keskeinen väline mikroelektroniikassa yhä ohuempia ja paremmin hallittuja ohutkalvorakenteita tavoiteltaessa. ALD-teknologiaa voidaan helposti soveltaa mikroelektroniikan lisäksi myös muuhun nanoteknologiaan. Nanofotoniikassa yritysten ja yliopistollisten tutkimusyksiköiden yhteistyö on tiivistä ja dynaamista. Yhteisprojekteja on meneillään kymmeniä koti- ja ulkomaisten yritysten kanssa.

Nanokemia- ja -teknologia ovat tärkeitä modernissa materiaalikemiassa ja mm. epäorgaanisen materiaalikemian opetuksessa nanomateriaalit ja -rakenteet tulevat entistä keskeisimmiksi. ALD-teknologiaa käytetään opinnäytetöissä. Läheinen yhteistyö ASMM:n kanssa linkittää sovellukset terveellä tavalla yliopiston tutkimukseen ja opetukseen. Se myös motivoi opiskelijoita.

Suomesta löytyy esimerkkejä koko nanoteknologian innovaatioketjusta, so. perustutkimuksesta kypsään liiketoimintaan. Näiden perusteella voidaan jo nyt arvioida, miten julkiset panostukset nanoteknologian tukevat parhaiten maan kansantaloutta niin lähivuosina kuin kauempana tulevaisuudessa. Panostukset nanoteknologiaan on nähtävä panostuksina kansalaisten elintason kohottamiseen.

Yritysten näkemyksiä nanoteknologian merkityksestä liiketoiminnassa

Nokia on yksi harvoista suomalaisista yrityksistä, jolla on nanoteknologiasta strateginen suunnitelma. Valtaosalla yrityksistä ei ole selkeää käsitystä nanoteknologiasta tai sen merkityksestä omassa liiketoiminnassa. Nanoteknologian mahdollisuuksista selvillä olevat yritykset tai niiden asiakkaat eivät välttämättä edes halua kutsua uusia menetelmiä nanoteknologiaksi, koska termiin liittyy ennakkoluuloja ja pelkoja. Joissakin tapauksissa nanoteknologia nähdään toisaalta uutena nimenä asioille, joita on tehty aikaisemmin. Sitä pidetään teknologisen kehityksen jatkumona, josta esimerkkeinä ovat elektroniikka ja IT-sektorit. Tällöin ei tiedoteta nanoteknologian tarjoamia periaatteellisesti uusia mahdollisuuksia.

Nanoteknologia ei ole yrityksille itseisarvo. Nanotiedettä ja nanoteknologiaa käytetään, jos tutkimus ja tuotekehitys niin vaativat ja jos tarvittava rahoitus järjestyy. Ne nähdään yhtenä mahdollisuutena toteuttaa asiakastarpeista lähteviä ratkaisuja uudella tavalla ja entistä tehokkaammin. Nanoteknologian katsotaan myös mahdollistavan aikaisemmin umpikujaan päätyneiden ratkaisujen uudelleen arvioinnin.

Yritykset uskovat, että teknologian kehitys nanomittakaavaan tulee tuomaan tuotteiden loppukäyttäjille näkyviä tuotteiden parannuksia ja mahdollistaa uusia tuotekonsepteja sekä kokonaan uusia liiketoimintamahdollisuuksia erityisesti uusille yrityksille. Nanoteknologian pohjautuvat innovaatiot voivat uudistaa ja monipuolistaa Suomen teollista rakennetta.

Nanoteknologiaa hyödyntävät alkavat ja pienet yritykset pitävät akuuttina ongelmana rahoittajien vähäistä nanoteknologian tuntemusta ja riskirahoituksen määrää. Nanoteknologian hyödyntäminen vaatii määrätietoista ja pitkäjänteistä toimintaa. Tämä vaatii toimivat rahoitusmarkkinat ja tutkimuksesta syntyneiden yritysten alkutaipaleen helpottamista. Julkisten rahoittajien on kehitettävä omaa toimintaansa, jotta ne pystyvät vastaamaan uuteen teknologiaan perustuvan liiketoiminnan kehittämiseen.

Yritykset pitävät yhtenä suurimpana hidasteena nanoalueen hyödyntämiselle tehokkaiden ja kilpailukykyisten tuotantoprosessien puuttumista. Nanoteknologian hyödyntäminen vaatii uusia investointeja tuotantolaitteisiin, koska nykyiset laitteet ovat luonteeltaan enimmäkseen laboratoriokäyttöön suunniteltuja. Uuden teknologian tuomien etujen täytyy siten olla merkittäviä, jotta niitä aletaan hyödyntää asiakkaan tuotteissa.

Nanoteknologian sovelluksista valtaosa on kaukana kaupallistamisvaiheesta. Nanoteknologian kehitys on teknologian S-käyrän alkuvaiheessa, jossa pyritään korostetusti kehittämään teknologiaa liiketoiminnallisesti hyväksyttävään muotoon. Tässä ns. kuohuntavaiheen tilanteessa myös pienille yrityksille tarjoutuu mahdollisuuksia merkittäviin innovaatioihin, kunhan riskirahoitus järjestyy. Erityisenä vaarana on kuitenkin se, että tuotekonseptien kehittyessä tuottavaksi, suuremmat ulkomaiset toimijat ostavat yritykset ja siirtävät innovaatiot muualle. Jotta edes osa innovaatioista voitaisiin säilyttää suomalaisena, olisi tuettava kansallisen yritysraakenteen kehittymistä niin, että pk-yritykset voisivat kasvaa kotimaisten suuryritysten sateenvarjon alla.

Nanoteknologian riskinä on odotusten epärealistisuus ajan suhteen. Esimerkit onnistuneista markkinoille päässeistä tuotteista ovat vielä harvassa. Leimallista on, että nanoteknologiat tarjoavat tuotteita erilaisiin täsmätarpeeseen, jolloin muiden alojen toimijoiden on vaikea oppia niistä. Nanotoksisuuteen ja ympäristövaikutuksiin liittyvät epävarmuudet hidastavat teollisuuden t&k-panostusten kehittymistä sekä sovellusten kaupallistumista. Lainsäädäntöön ja vastuisiin liittyvät kysymykset ovat myös paljon selvittämättä. Lisäksi kokoon, manipuloinnin vaikeuteen ja lyhyeen historiaan liittyy riski osoittaa nanoteknologian hyödyt kansalaisille. Tämä jättää tilaa epäluuloille ja peloille. Kansalaisten nanoteknologiatietoisuuden nostaminen on tärkeää. *Yritykset tarvitsevat nanoteknologian liiketoimintaan liittyvää tutkimustietoa ja koulutusta sen laajassa merkityksessä.*

5.4 Nanoteknologian koulutustarve yrityksissä

Uusien nanoteknologiaan perustuvien tuotteiden kehittäminen ja soveltaminen tuotantoprosesseissa edellyttää poikkitieteellistä ja -teknologista osaamista ja teollisten tuotantoprosessien ymmärtämistä. Nanoteknologian soveltaminen edellyttää usein lähialueiden, kuten mikroelektroniikan ja ohjelmistotekniikan osaamista. Poikkitieteellisyys on helpointa saavuttaa usean alan osaajan ryhmässä, jonka jäsenet oppivat ymmärtämään toistensa kieltä ja muiden tieteenalojen perusteita sekä tutkimusperinteitä. Useat työryhmytyöissä haastatelluista yritysten edustajista odottavat koulutuksella nopeutettavan eri alojen edustajien yhteistyötä. Yksittäisten monialaosaaajien kouluttamista ei pidetty niin tärkeänä. Koulutusta tulisi antaa nanoteknologioita soveltavilla aloilla sekä niillä aloilla, joilta todennäköisimmin päädytään rahoittamaan tai hyödyntämään erilaisia uusia teknologioita. Varsinaista nanotieteen koulutusta pidettiin useassa vastauksessa tarpeettomana. Alan tieteellisen koulutuksen katsottiin hoituvan, kun perustieteenalat opetetaan kunnolla. Alaa tukevan koulutuksen vahvistamista ammattikorkeakouluissa pidettiin merkityksellisenä.

Haasteet ovat suuret yritysten henkilöstön osaamisen päivittämisessä ja uudenlaisten nanoteknologian osaajien rekrytoimisessa yrityksiin. Vaikka koulutuskysymyksissä painotettiin syvällistä ilmiöosaamista joltain nanotieteeseen liittyvältä alalta, yritykset ilmoittivat rekrytoivansa sekä moni- että täsmäosaajia tehtävästä riippuen. Monialaosajana palkattu on osoittautunut käytännössä usein syvällisesti vain oman erikoisalueensa tuntevaksi. Huippututosten katsottiin olevan saavutettavissa vain erikoistumisen kautta. Toisaalta todettiin, että pienyritykset tarvitsevat nimenomaan moniosaajia. Tarvitsemme sekä *nanoteknologian uusia aluevaltauksia hallitsevia tutkijoita* että nanoteknologianosaajia, jotka *pystyvät kaupallisesti merkittävien mahdollisuuksien tunnistamiseen*.

6 Nanoteknologian innovaatiotoiminta ja teknologiansiirto

Yhdysvaltain talouden etumatka suhteessa muihin teollisuusmaihin on kasvanut 1980-luvun alusta lähtien. Kasvu liitetään Yhdysvaltain taloudelliseen, kulttuuriseen ja sosiaalisen ilmastoon sopeutua maailmantalouden teknistaloudellisen paradigman muutokseen: kykyyn kehittää uusia teknologioita, tuotantopanoksia, organisatorisia ratkaisuja, markkinoita, lainsäädäntöä ja julkisen sektorin tehtäviä muuttuvassa toimintaympäristössä³⁴.

Yhdysvaltain johtava asema nanoteknologiassa perustuu amerikkalaiseen yhteiskuntaan syvälle juurtuneisiin sosiaalikulttuurisiin arvoihin. Poliittisilla päätöksentekijöillä, yrityksillä ja riskisijoittajilla on yhteinen käsitys siitä, kuinka tutkimustulokset ja teknologiset innovaatiot tulee kaupallistaa³⁵. Yhdysvallat hyötyvät kolmesta tekijästä: 1) *Maailman mittakaavassa parhaiden yliopistojen tuottamista käänteentekevästä teknologioista ja niiden siirtämisestä teollisuustuotantoon* (USA panostaa teollisuusmaista eniten tutkimukseen, yliopistoille on annettu lailla taloudelliset edellytykset innovaatioiden kaupallistamiseen ja yritykset käyttävät näitä voimavaroja hyväkseen t&k-toiminnassaan); 2) *Konstruktiiivisesta yrityskulttuurista*, joka kannustaa yrittäjyyteen ja yritysten perustamiseen (yliopistouralta edetään alkaviksi yrittäjiksi, tiedepuistot kuhisevat innovatiivisia ajattelijoina); sekä 3) *Riskipääomista*, joita Yhdysvalloissa on käytettävissä eniten maailmassa (välttämätöntä alkaville yrityksille erityisesti uusien 'mullistavien' teknologioiden kaupallistamiseksi). Yhdysvalloille on myös leimallista kansallisen turvallisuuden nimissä tehtävä voimakas sotilasteollinen t&k, joka mahdollistaa uusien nanotieteen innovaatioiden voimakkaan subvention kehityksen alkuvaiheessa (ns. kuolemanlaaksossa), josta tuotekonsepti voi kehityksen myöhemmässä vaiheessa kypsempänä ja edullisempana tulla myös siviilipuolen sovellutuksiin.

Nanoteknologian yritykset tarvitsevat 'kuolemanlaakson' ylitettyään riskirahoitusta ja tukimekanismeja ensin liiketoiminnan muuttamiseksi pilottivaiheesta pienimuotoiseksi yritystoiminnaksi ja sen jälkeen päästäkseen tuotteillaan maailmanmarkkinoille. Yhdys-

³⁴ Mm. Hämäläinen, T. J., Heiskala, R. (2004) Sosiaaliset innovaatiot ja yhteiskunnan uudistumiskyky. Edita. Helsinki.

³⁵ Nordan, M. M. (2005). Nanotechnology: Where Does the U.S. Stand? Luxresearch, June 29 2005. Luc Research Inc.

valloissa käytettävässä olevasta riskirahoituksesta huolimatta liittovaltio on lisännyt julkista tukea yrittäjyyden tukemiseksi ja yliopistojen laboratorioissa syntyvien innovaatioiden kaupallistamiseksi. Yliopistojen tutkimuslaboratorioiden ja teollisuustuotannon väliin tarvitaan myös tuotantolinjoja, joissa start-up -yritykset voivat pilotoida uusia tuotteitaan.

Monissa Euroopan maissa innovaatioketjun vakavimmaksi puutteeksi on arvioitu riskirahoituksen sekä osaavien riskisijoittajien ja yrittäjien puute. Kun innovaatioketjusta puuttuu lenkkejä, ei yliopistoissa syntyviä tutkimustuloksia ja teknologisia innovaatioita ole pystytty kaupallistamaan tehokkaasti. Tilanteen toistuminen halutaan välttää Euroopassa nanoteknologiassa kiinnittämällä huomiota innovaatioketjun katkeamattomuuteen ja heikkoihin lenkkeihin.

Suomen innovaatiojärjestelmän perustan muodostavat korkeakoulut ja tutkimuslaitokset (mm. VTT ja sektoritutkimuslaitokset), yritykset sekä yksityiset ja julkishallinnon organisaatiot. Sitä ohjataan ja tuetaan julkisen rahoitusjärjestelmän (Suomen Akatemia, Tekes ja Sitra) ja poliittisen päätöksentekojärjestelmän (eduskunta, valtioneuvosto, ministeriöt, tiede- ja teknologianeuvosto) kautta. Suomen talouden poikkeuksellisen rajun rakennemuutoksen yhteydessä 1990-luvun puolivälissä panostettiin sekä koulutukseen ja tutkimukseen (mm. korkeakoulujen ja Suomen Akatemian tutkimusrahoitusta lisäämällä) että tutkimustulosten ja teknologisten innovaatioiden kaupallistamiseen (mm. Tekesin ja suoraa yritystukea lisäämällä, ja kehittämällä välittäjäorganisaatioiden toimintaa).

Nanoteknologian kaupallistamiseen liittyvät maassamme samat haasteet kuin uuden pääomaintensiivisen teknologian kaupallistamiseen yleensä.

6.1 Teknologiansiirto ja välittäjäorganisaatiot

Korkeakouluissa ja tutkimuslaitoksissa syntyvät teknologiset innovaatiot ja osaaminen siirtyvät Suomessa yrityksiin tai uudeksi yritystoiminnaksi neljää eri tietä: 1) Yliopistojen, korkeakoulujen ja yritysten yhteisten t&k-kehittämishankkeiden kautta; 2) Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen (VTT) kautta; 3) Välittäjäorganisaatioiden esim. (tiedepuistot, yrityshautomot, osaamiskeskukset) kautta; sekä 4) Koulutetun työvoiman kautta. Nanotieteessä syntyvien teknologisten innovaatioiden tehokkaassa tuotteistamisessa ja kaupallistamisessa kaikki edellä mainitut keinot ovat tarpeen. Uusia instrumentteja ei välttämättä tarvita. Olemassa olevien organisaatioiden yhteistyön ja toiminnan laatua on kehitettävä erityisesti raja-alueilla (mm. nanoteknologiaan liittyvä liiketoiminta, johtaminen ja yrittäminen). Tavoite on saada korkeakoulut, vanhat ja uudet yritykset, VTT, tiedepuistot ja muut välittäjäorganisaatiot toimimaan toisiaan tukevinä klustereina ja verkostoina.

VTT

Uudet teknologia-avaukset, kuten nanoteknologia, joissa olennaisia elementtejä ovat monitieteellisyys ja välittömän kaupallisen potentiaalin epävarmuus, ovat yrityksille riskialttiita. VTT on Suomen valtion omistama puolueeton tutkimuslaitos, jonka toiminta on pääasiassa soveltavaa tutkimus- ja kehitystyötä. VTT:llä on vakiintunut rooli sillanrakentajana yritysten ja uusien teknologioiden arvioinnin, tutkimuksen ja käyttöönoton välillä. VTT:n yleisenä toiminta-ajatuksena on lisätä aktiivisesti suomalaisten yritysten kansainvälistä kilpailukykyä luomalla ja soveltamalla korkeatasoista teknistieteellistä osaamista eri teknologia-aloilla. Toiminnan kolme kulmakiveä ovat strateginen perustutkimus, soveltava tutkimus sekä tutkimus- ja asiantuntijapalvelut. VTT:n moniteknologiaympäristö mahdollistaa

poikkitieteellisten, tulevaisuuden kannalta merkittävien teknologia-alueiden, kuten nanoteknologian, tutkimusta ja käyttöönottoa.

Tulevan kehityksen ennakkointi on yksi VTT:n keskeisistä tehtävistä. Yhdessä yritysten kanssa ennakoidaan ja työstetään myös tulevia tarpeita, jotta voidaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa käynnistää tarkoituksenmukaisia toimenpiteitä. Tavoitteena on yritystoimintaa edistävien teknologisten läpimurtojen kehittäminen. VTT:n ja yritysten yhteistyön muoto vaihtelee perustutkimuksellisista julkisrahoitteisista yhteisprojekteista yrityskohtaiseen luottamukselliseen tuotekehitystyöhön. VTT:lla oli yli 3000 kotimaista yritysasiakasta ja n. 700 ulkomaista asiakasta 2004. VTT:n nanoteknologiaprojektien rahoitus kaksinkertaistui noin 1,5 miljoonasta eurosta 3 miljoonaan euroon ja yritysrahoituksen kasvu oli yli kahdeksankertainen vuodesta 2004 vuoteen 2005 (1.9.2005 tiedot). Tuona aikana EU-projektien määrä kasvoi viidestä seitsemään (0,64 miljoonasta eurosta 1,00 miljoonaan euroon).

Alkaville ja tutkimuksesta syntyville yrityksille välittäjäorganisaatiot ovat mm. liiketoimintaosaamisen, yrityshautomotoiminnan ja yrittäjyyden kehittämisen kannalta keskeisiä. Yhtä tärkeää erityisesti pienyrityksille on, että niillä on käytettävissä teknologista asiantuntemusta ja koelaboratorioita pilotti- ja pienimuotoiseen sarjatuotantoon.

6.2 Nanoteknologian tutkimus- ja tuotekehitysrahoitus

Nanotiede on saanut tutkimusrahoitusta *Suomen Akatemialta* yleisten ja ohjelmahakujen yhteydessä ilman erillistä nanotieteeseen ja -teknologiaan suunnattua rahoitusta. Nanotieteeseen liittyviä tutkimusohjelmia ovat mm. Tulevaisuuden elektroniikka (TULE, 2003–2006), Elektroniikan materiaalit ja mikrosysteemit (EMMA, 1999–2002), Materiaali- ja rakennetutkimus (MATRA, 1994–2000) sekä Neurotiede (NEURO) ja Mikrobit ja ihminen (MICMAN).

Suomen Akatemia käynnistää Nanotieteen tutkimusohjelmaa (FinNano) vuosiksi 2006–2010. Ohjelman aihe-alueet ovat ohjattu itsejärjestäytyminen, toiminnallisuus nanomitakaavassa ja nano-objektien ominaisuudet³⁶. Ohjelman budjetti on 9 miljoonaa euroa. Suomen Akatemia on myös partnerina ERA-NET -hankkeessa NanoSci-ERA (2005–2007), joka verkottaa 12 eurooppalaista kansallista rahoittajaa ja näiden nanotieteen tutkimusohjelmia.

³⁶ Aihealueita on avattu seuraavin esimerkein. Ohjattu itsejärjestäytyminen: bioinspiroidut-, biomimeettiset- ja biomateriaalit; keinotekoiset itsejärjestäytyvät järjestelmät; kontrolloidut synergiset materiaalit; koodatut kompleksirakenteet; hybridimateriaalit; itsejärjestäytyvät kontrolloivat pinnat; sekä itsejärjestäytyminen litografiassa ja elektroniikassa. Toiminnallisuus nanomitakaavassa: funktionaaliset keinotekoiset ja bionanolaitteet ja sensorit; bioinspiroidut vapautus- ja kuljetustoiminnot; energiansiirto keinotekoisissa järjestelmissä; ohjattu itsemonistuminen; bionanoteknologia elektroniikassa ja materiaalitieteessä; itsekorjautuvuus nanorakenteissa; sekä uudet funktionaaliset molekulaariset ja biomolekulaariset järjestelmät. Nano-objektien ominaisuudet: yksittäisen molekyylin ominaisuuksien arviointi; nanoskaalan piirit, mekaniikka, havainnointi ja fotoaktiiviset järjestelmät; molekyyliuistit; molekyylikoneet; uudet nanokokoiset järjestelmät kuvantamisessa; nano- ja biokatalyyysi; sekä nanoskaalan vuorovaikutukset pinnoilla. Lähde: Nanotieteen ja nanoteknologian toimintaohjelma FinNano 2006–2009. Suomen Akatemian nanotieteen tutkimusohjelman valmisteluryhmän muistio 31.12.2004.

Tekes käynnisti tammikuussa 2005 viisivuotisen nanoteknologiaohjelman (FinNano, 2005–09)^{37,38}. Ohjelman painopistealueet ovat 1) Innovatiiviset nanorakenteiset materiaalit; 2) Nanosensorit ja -aktuaattorit; 3) Nanoelektroniikan uudet ratkaisut. Ohjelman arvioitu kokonaisvolyymi on 70 miljoonaa euroa, josta Tekesin rahoitusosuus on 46 miljoonaa euroa (tutkimusrahoitus 25 miljoonaa euroa ja yritysrahoitus 20 miljoonaa euroa) loppuosan rahoituksesta tulella pääosin yrityksiltä ja VTT:ltä.

Tekesin FinNano-teknologiaohjelman missiona on tehdä suomalaisista tutkimusorganisaatioista haluttuja yhteistyökumppaneita ja Suomesta yksi Euroopan parhaista nanoteknologian kehittäjistä valituilla alueilla. Tavoitteena on edesauttaa nanoteknologian siirtymistä yritysten käyttöön ja varmistaa, että Suomen kyky nanoteknologian alueella vahvistuu ja kasvaa kansainvälisesti houkuttelevaksi uudelle yritystoiminnalle. Tekesin FinNano-teknologiaohjelmassa on mukana yli 50 suomalaista yritystä omilla tuotekehityshankkeillaan tai mukana tutkimusyksiköiden tutkimusprojekteissa. Tekesin nanoteknologiaohjelma on mukana eurooppalaisessa MNT ERANET:ssä, joka verkottaa kansallisia nano- ja mikroteknologiaohjelmia.

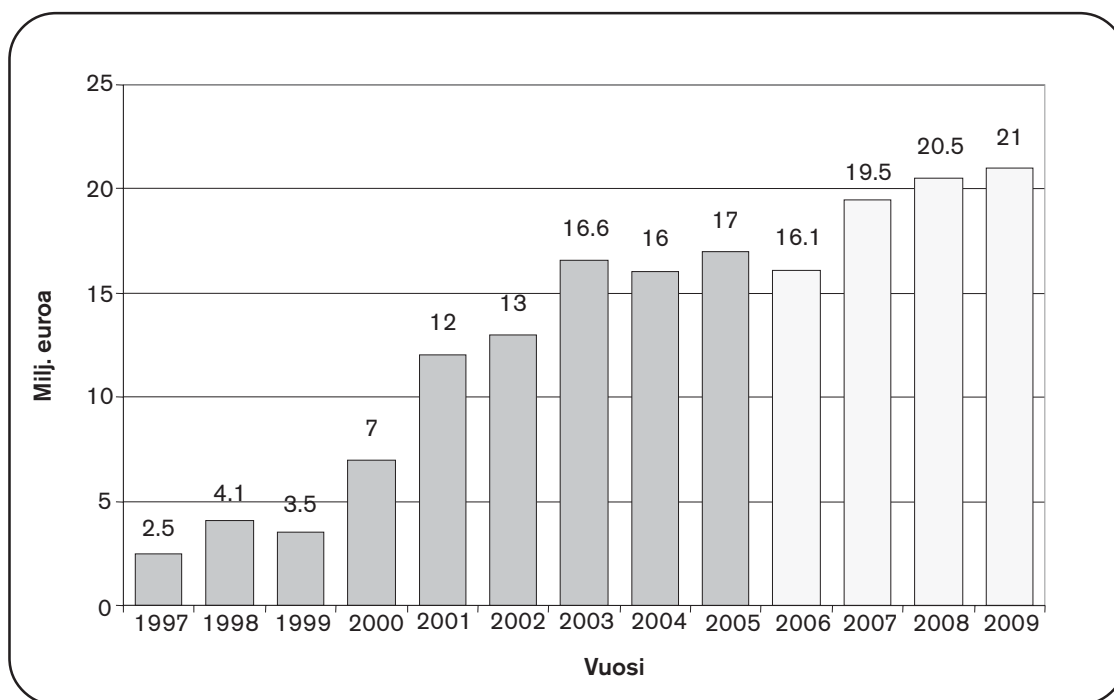
Tekesin teknologiaohjelmissa on nanotekniikkaan panostettu seuraavasti:

- NeoBio, Uusi bioteknologia (2001–2005): modernit bioteknologian menetelmät
- COMBIO, Terveystieteiden biomateriaalit (2003–2007): kudosteknologian materiaalit ja menetelmät, lääkeannostelun uudet materiaalit sekä implantit
- ELMO, Elektroniikan miniaturisointi (2002–2005): mikro/nano-hybridit, nanoelektroniikan ja -optiikan moduulit, makromolekyyleihin ja itseorganisointuuteen perustuvat komponentit biomateriaaleihin
- FinnWell, Terveystieteiden teknologiaohjelma (2004–2008): diagnostiikka
- PINTA, Likaantumattomat pinnat (2002–2006): pintojen fysikaalisten, kemiallisten ja sähköisten ominaisuuksien tutkiminen ja soveltaminen
- FINE, Pienhiukkaset - Teknologia, ympäristö ja terveys (2002–2005)

Lisäksi Lääke2000-teknologiaohjelmalla ja jo päättyneellä Diagnostiikka2000-teknologiaohjelmalla on liittymäkohtia nanoteknologiaan.

³⁷ Ohjelman tavoitteena on 1) Vahvistaa olemassa olevaa alan tutkimusta, tutkimusedellytyksiä ja rakentaa uutta osaamista monitieteisissä tutkimusryhmissä ja kehittämisseskuksissa; 2) Tehostaa tutkimustiedon taloudellista hyödyntämistä muuntamalla tutkimustulokset teknologioiksi ja tuotteiksi sekä vahvistaa ja nopeuttaa nanoteknologian kaupallista kehitystä; 3) Tukea kansallista ja kansainvälistä verkottumista ja tutkijaliikkuvuutta; 4) Edistää suomalaisten tutkijoiden, tutkimuslaitosten ja yritysten osallistumista Euroopan unionin nanoteknologian tutkimus- ja kehittämissohjelmiin; 5) vahvistaa alueellisia osaamiskeskittymiä ja linkittää ne kansainvälisiin verkostoihin; 6) Edistää tehokasta ja synergistä resurssien ja infrastruktuurien käyttöä; 7) Kannustaa yrityksiä näkemään nanoteknologian mahdollisuudet ja huolehtia siitä, että syntyy hyvät edellytykset hyödyntää nanoteknologian sovelluksia. Lähde: <http://webserv2.tekes.fi>

³⁸ Tekes on linjannut 2005 uudistetussa teknologiastrategiassa osaamistarpeita ja painopisteitä. Tekes on valinnut teknologioiden painopisteiksi tieto- ja viestintä-, bio-, materiaali- ja nanoteknologian. Painopisteet ovat rajattuja kokonaisuuksia, joita kehittämällä voidaan tehdä uusia teknologiaharpauksia, luoda uusia sovelluksia sekä vahvistaa, uudistaa ja yhdistää toimialoja. Liiketoimintalähtöisyys ja -osaaminen nousevat yhä merkittävämpinä teknologisen osaamisen rinnalle. Nanoteknologia on Tekesin kannalta tärkeä monitieteinen panostusala, jonka perusteet luotiin ensimmäisellä Nanoteknologia-ohjelmalla 1997–1999. Tekes on rahoittanut nanoteknologian kehittämistä viimeisen viiden vuoden aikana yli 60 miljoonalla eurolla 250 hankkeessa. Tänä vuonna Tekesin ja Suomen Akatemian myöntämä rahoitus nanotieteeseen ja nanoteknologiaan on nousemassa jopa 20 miljoonaan euroon (Kuva 2). Tämä on 3,8 euroa / asukas (2003: 2,7), joka on hyvä kansainvälinen taso (2003: Japani 6,2; USA 3,6; Sveitsi 3,4). Julkaisu Innovaatioista hyvinvointia – Painopisteet tulevaisuuden rakentamiseksi löytyy Tekesin [www-sivuilta](http://www.tekes.fi)



Kuva 2. Tekesin ja Suomen Akatemian myöntämä rahoitus nanotieteeseen ja nanoteknologiaan vuosina 1997–2005 (ennakkotiedot vuodelta 2005 (10/2005)). Suunniteltu julkinen rahoitus vuoteen 2009 asti sisältää opetusministeriön nanotieteen ja -teknologian kehittämisohjelman, jonka rahoitus on tässä jaettu samansuuruisiin vuosieriin, 8 miljoonaa euroa/vuosi. (Lähde: Tekes, Suomen Akatemia ja opetusministeriö).

Yritysten nanoteknologian t&k-toimintaan käyttämän rahoituksen määrästä ei ole tarkkoja arvioita. Merkittävimmät rahoittajat ovat elektroniikkateollisuus ja kemian teollisuus.

Nanoteknologian, kuten muunkin alkavan high-tech -teknologian, ongelmana on riskirahoituksen kehittymättömyys Suomessa, varsinkin, kun globaalissa kilpailussa suurvallat voivat subventoida alkavia tuotekonsepteja kansalliseen turvallisuuteen liittyvillä näkökohdilla. Pk-yritysten rahoitukseen, kuten mentorointiinkin olisi kehitettävä uudenlaisia toimintatapoja.

6.3 Nanoteknologian liiketoimintaosaaminen

Nanoteknologian tutkiminen ja soveltaminen liittyy vahvasti osaamis pohjaiseen ja verkostoituneeseen liiketoimintaympäristöön. Yritysten proaktiivinen toiminta ja verkottuminen monitieteisiin tutkimusryhmiin sekä infrastruktuurin yhteiskäyttö luovat edellytyksiä kannattavalle ja kestäväälle liiketoiminnalle. Nanoteknologian sovelluksia sääteleviä määräyksiä ei toistaiseksi ole. Nanotekniikan yritykset on perustettu tieteellisen tutkimuksen pohjalta, niillä on lähtökohtaisesti vahva teknologiaperusta ja ne omistavat nanoinnovaatioiden immateriaalioikeudet. Bioteknologian ja elektronisen liiketoiminnan analogiat eivät suoraan päde nanoteknologiassa.

Nanoteknologian kaupallistamisessa ei riitä yksin teknologia, vaan lisäksi tarvitaan liiketoiminnan ja business-systeemin ymmärrystä, näkemystä kuluttajien tarpeista, jotta voidaan ideoida tulevaisuuden uudenlaisia tuotteita, sekä loppuasiakkaiden hyväksyntä. Haasteena on kytkeä tutkimusryhmät ja yritykset toisiinsa varhaisessa vaiheessa ja identifioida tarkemmat sovellusten tavoitteet mahdollisimman varhain. Suuri haaste on kemian, fysiikan, biologian

ja insinööritieteiden yhdistäminen nanoluokan uusiksi sovelluksiksi, sekä näihin yhdistettyinä liiketoimintaosaaminen ja tuotesuunnittelu. Nanoteknologian alueen innovaatioiden hallinta sisältää neljä rakenteellista kohtaa:

- 1) tuotteen tai tuotteiden ydintoiminnallisuuksien merkityksen ymmärtämisen liiketoiminnassa,
- 2) asiakkaiden tarpeiden ja ongelmien ymmärtämisen,
- 3) ideoiden kehittämisen eli milloin ja kuinka nanoteknologiaa käytetään, ja
- 4) ideoiden evaluointi ja priorisointi sekä nanoteknologiaprojektin määrittely.³⁹

Nanoteknologian teknologian edistymisen rinnalla on myös tieteellisesti selvitettävä ja arvioitava sen mahdolliset riskit. Nanoteknologioiden mahdollisia terveys-, ympäristö- ja kuluttajariskejä tarkasteltaessa on arvioitava, missä määrin voidaan hyödyntää jo olemassa olevaa tietoa ja missä määrin on luotava uutta nanoteknologiaspesifistä tietoa toksikologiasta ja ekotoksisuudesta. Uuden tietämyksen luomisessa kansainvälinen yhteistyö on tärkeää. Nanoteknologian liiketoimintaosaamisen kehittämisen kannalta vakava puute on, ettei Suomessa ole yhtään (nano)teknologia liiketoiminnan tutkimukseen pitkäjänteisesti suuntautunutta laitosta.

³⁹ Prof. Hugo Tschirky, PhD, DBA, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, The 2nd Annual Meeting TOP NANO 21

7 Nanotieteen ja -teknologian kehittämishaasteet Suomessa

Raportin alussa korostettiin, että nanotieteen ja nanotekniikan suurimmat odotukset ovat monitieteellisissä aidosti uusissa lähestymistavoissa. Tässä keskitytään lähinnä niihin.

Suomessa tehdään joillakin aloilla kansainvälisesti korkeatasoista nanotieteen ja nanoteknologian sekä niihin läheisesti liittyvää tutkimusta. Suomen tutkimusjärjestelmää leimaa kuitenkin tutkimuksen pienimuotoisuus ja tutkimusjärjestelmän rakenteellinen hajanaisuus, mikä korostuu nanotieteen kaltaisella, monitieteisellä ja kalliita laiteinvestointeja edellyttävällä alalla. Suomella ei ole pienenä maana edellytyksiä korkeatasoiseen nanotieteen tutkimukseen ja teknologiseen kehitystyöhön laajalla rintamalla. Keskittämällä voimavaroja joillekin kansainvälisesti vahvoille tutkimus- ja teknologia-aloille (keihäänkärkialoille) Suomella on kuitenkin edellytykset tehdä kansainvälisesti merkittäviä tieteellisiä ja teknologisia läpimurtoja. Tärkeää on, että nanoteknologiaohjelmassa kohdennettava rahoitus yhdistetään yliopistojen ja muiden rahoittajien panostuksiin. Keskittämiseen sisältyy riskejä, mutta myös mahdollisuuksia. Se kannustaa myös yliopistoja tekemään omia valintoja, profiloitumaan. Kaikkien ei ole välttämätöntä keskittyä nanotieteeseen. Sen ulkopuolella on paljon mielenkiintoista tutkittavaa ja mahdollisesti muita uusia avauksia.

Suomeen on jo syntynyt joitakin nanotieteen ja -teknologian osaamiskeskittymiä, tutkimuksen keihäänkärkiä, samoin tutkimuslaitosten ja teknologiayritysten klustereita. Koska maailmanlaajuisesti nanotiede ja -teknologia ovat jo voimakkaasti edistyneet tutkimuslaboratorioista kohti teollisia tuotteita, on järkevää kehittää ja vahvistaa Suomen nanotiedettä olemassaolevista osaamiskeskittymistä. Nanoteknologian ja siihen liittyvän innovaatiotoiminnan merkityksen voidaan olettaa kasvavan lähivuosina entisestään sekä teollisuuden avainaloilla ja monilla uusilla, nopeasti kasvavilla aloilla, mm. palvelusektorilla. Näillä tulee olemaan suuri kansantaloudellinen merkitys. Tästä syystä nanoteknologiaohjelmassa on kiinnitettävä huomiota edellytyksiin ja keinoihin uudistaa vakiintuneiden toimialojen prosesseja ja tuotteita ja luoda Suomeen uutta osaamista, teknologiaa ja yritystoimintaa.

Valtioneuvoston periaatepäätöksessä julkisen tutkimusjärjestelmän rakenteellisesta kehittämisestä (VNp 7.4.2005) tavoitteeksi asetetaan kansainvälisesti kilpailukykyisten tieteen ja teknologian osaamiskeskittymien ja huippuyksiköiden synnyttäminen ja vahvistaminen sekä laajojen infrastruktuurien kehittäminen ja niiden entistä parempi hyödyntäminen.

Keskeisenä haasteena on kansainväliseen huippuun yltävän t&k-toiminnan kehittäminen aloilla, jotka ovat kansantalouden, yhteiskunnan muun kehityksen ja kansalaisten hyvinvoinnin kannalta tärkeimpiä.

Euroopan komission tavoitteena on luoda Eurooppaan taloudelliset näkökohdat sekä tutkimuksen, koulutuksen ja innovaatiotoimintaan liittyvät synergiat huomioonottaen maailmanluokan nanoteknologian infrastruktuureja, huippututkimusta, osaamiskeskuksia ja verkostoja. EU:n nanotieteen tutkimusrahoitus on tarkoitus kohdentaa nanotieteen, nanoteknologian, materiaalien ja uusien tuotantoteknologioiden tutkimukseen. Suomi voi ja sen tulee hyödyntää EU:n tarjoamia mahdollisuuksia luomalla Suomeen korkeatasoisia nanotieteen ja nanoteknologian osaamiskeskittymiä ja infrastruktuureja sekä osallistumalla niiden kautta aktiivisesti yhteisiin t&k-hankkeisiin valituilla avainalueilla.

7.1 Nanotieteen ja -tekniikan osaamiskeskittymien ja keihäänkärkien valintakriteerit

Suomen nanotieteen ja -tekniikan keihäänkärkialoja ovat

- nanomateriaalit
- nanoelektroniikka ja -fotoniikka
- nanobiotekniikka⁴⁰

Työryhmä ehdottaa, että

- nanotieteen ja nanotekniikan osaamiskeskittymät (ml. usean yksikön muodostamat konsortiot) sekä kehitettävät Suomen nanotieteen ja -tekniikan tutkimuksen keihäänkärjet valitaan näiltä aloilta seuraavien kriteereiden perusteella
- 1) *Osaamiskeskittymän edellytykset kansainvälisesti merkittävään nanotieteen tutkimukseen ja läpimurtoon keihäänkärkialoilla* (arviointi: julkaisut⁴¹ ja kutsutut esitelmät korkeatasoisilla foorumeilla, sitaatioiden määrä, tieteelliset tunnustukset ja palkinnot esim. viiden viimeisen vuoden aikana);
 - 2) *Osaamiskeskittymän edellytykset hankkia Suomen Akatemian, Tekesin, EU:n ja muuta tutkimusrahoitusta* (arviointi: keskittymän SA-, Tekes-, EU- ja muu nanotieteen tutkimusrahoitus esim. viiden viimeisen vuoden aikana);

⁴⁰ *Nanomateriaalit* yhdistävät useita tieteenaloja, joissa käytetään nanokokoluokan erityisiä ominaisuuksia periaatteellisesti uudenlaisten toimintojen ja ominaisuuksien aikaansaamiseksi. *Nanoelektroniikka* yhdistää elektronisten rakenteiden erityiset nanokokoluokan ominaisuudet komponentteihin periaatteellisesti uudenlaisten toimintojen aikaansaamiseksi. *Nanofotoniikka* on se osa fotonikasta, jossa käytetään hyväksi nanokokoluokan erityisiä ominaisuuksia periaatteellisesti uudenlaisten toimintojen aikaansaamiseksi. *Nanobiotekniikka* yhdistää biotieteet muihin tieteenaloihin hyödyntäen nanokokoluokan biomolekyylien ja virusten erityisiä ominaisuuksia uudenlaisten toimintojen ja rakenteiden aikaansaamiseksi.

⁴¹ Korkeatasoisilla tieteellisillä artikkeleilla tarkoitetaan tässä aidosti korkeinta tasoa olevia artikkeleita. Eri aloilla on omia vakiintuneita huippulehtiä. Tyypillisesti näiden lehtien vaikuttavuusindeksit voivat olla jopa 4–5, ja joillain biotieteiden aloilla paljon suuremmat, johtuen tutkimuksen laajuudesta. Näissä julkaistaan valtaosa hyvästä tutkimuksesta, niin maailmalla kuin Suomessa, ja siten niiden perusteella on vaikea erottaa huiput hyvistä. Tässä yhteydessä ei tarkoiteta tällaisia lehtiä, vaan aidosti parhaimpia tieteellisiä lehtiä, joissa julkaiseminen on erityinen ansio. Näillä julkaisuilla usein painokerroin on 7–8 tai korkeampi ja joillain biotieteiden aloilla suurempi. Korkean painokertoimen perusteella eri alojen lehtiä ei voida suoraan verrata keskenään, mutta silti korkea painokerroin heijastelee sitä, että niissä julkaiseminen vaatii erityistä innovaatiota ja siten se antaa työkalun erottaa todelliset tieteelliset huiput.

- 3) *Osaamiskeskittymän edellytykset luoda osaamiskeskusten, yritysten, ja tutkimustulosten muiden hyödyntäjien verkostoja sekä koordinoida EU- ja muita tutkimus- ja teknologiahankkeita* (arviointi: keskittymän kansainvälinen asema ja yhteydet, EU- ja muiden hankkeiden koordinointi ja osallistuminen);
- 4) *Korkeatasoinen infrastruktuuri ja sen ylläpitäminen* (arviointi: olemassa oleva infrastruktuuri; emoyliopiston/-yliopistojen, tutkimuslaitosten tuki ja sitoutuminen; ESFRI, EU:n nanoteknologian toimintaohjelma, rakennerahastot ja investointipankki, kunnat, muut mahdolliset rahoittajat);
- 5) *Osaamiskeskittymän edellytykset tukea ja kehittää teknologia liiketoimintaa* (arviointi: nykyinen teknologia liiketoiminta ja teknologiansiirto; patentit ja muu tulosten suojaaminen; teknologiakeskukset ja tiedepuistot; teknologia liiketoimintaan liittyvä koulutus);
- 6) *Osaamiskeskittymän edellytykset uudistaa olemassa olevaa ja luoda uutta yritystoimintaa* (arvio: nykyinen yritys yhteistyö, perustettavat teknologia yritykset ja niiden houkuttelemat kolmannet osapuolet, kuten rahoittajat ja muut yritykset, teollisuuden avainalueet; alan odotusarvo yritystoiminnan kannalta);
- 7) *Nanotieteen koulutus* (arviointi: monitieteisen nanotieteen ja nanoteknologian koulutuksen järjestäminen, Nanotieteen ja nanoteknologian maisteriohjelmat, Nanotieteen tutkijakoulut, kansainvälinen tutkijankoulutus ja tutkijankoulutus yhteistyö);
- 8) *Miten osaamiskeskittymät täydentävät ja tukevat muita osaamiskeskittymiä ja -verkostoja* (arviointi: keskittymien välinen työnjako, mahdollisuudet muiden alojen -mm. biotekniikka, lääketiede, informaatioteknologia, hyvinvointitekniikka - tutkijoille hyödyntää tutkimuslaitteita ja osaamista, valmiudet tutkimus-, koulutus- ja teknologia yhteistyöhön muiden alojen kanssa).⁴²

Työryhmä esittää edelleen, että

- Opetusministeriö kohdentaa edellä mainittujen kriteereiden perusteella valituille nanotieteen ja nanoteknologian osaamiskeskittymille ja tutkimuksen keihäänkärjille vuosina 2007–2009 yhteensä 24 miljoonaa euroa
- tarkempi kohdennus tehdään yliopistojen esitysten ja todennettujen tarpeiden (mm. erikoistilat, tutkimuslaitteet, tietotekninen ja muu infrastruktuuri sekä näiden ylläpitäminen, tutkimus ja tutkimusyhteistyö, tutkijan- ja muu koulutus ja kansainvälinen tutkijanvaihto, laajojen tutkimus- ja teknologiahankkeiden koordinointi, teknologiansiirtoprosessit) perusteella yliopistojen kanssa käytävissä tulosneuvotteluissa
- osaamiskeskittymät kartoittavat osaamisalueensa muut toimijat (korkeakoulut, tutkimuslaitokset ja yritykset) Suomessa ja tekevät sopimuksia ja yhteistyötä niiden kanssa
- CSC koordinoi tietoteknistä infrastruktuuria ja tietoteknisiä palveluja.

Ehdotuksella tuetaan vahvojen, kansainvälisesti kilpailukykyisten ja aktiivisten, aidosti monialaisten nanotieteen ja nanoteknologian osaamiskeskittymien syntymistä Suomeen keskinäisen työnjaon pohjalta. Keihäänkärkiä tunnistettaessa on otettu huomioon Tekesin FinNano-teknologiaohjelman ja Suomen Akatemian FinNano-tutkimusohjelman painopistealueet.

⁴² Vaikka edellä mainitut 8 kohtaa ovat kaikki tärkeitä, on osa niistä muista tärkeimpiä. Esimerkiksi kyky luoda uutta luovaa ja innovatiivista tiedettä ja kaupallistettavaa teknologiaa ovat välttämättömiä. Näiden painotus riippuu taas siitä, onko institution pääasiallinen tehtävä tieteellinen tutkimus vai teknologian kaupallistaminen.

Opetusministeriön nanotieteen ja -teknologian kehittämisohjelmassa tutkimus nähdään laajasti. Ohjelmaesityksen tavoitteet ovat yhdensuuntaiset Suomen Akatemian ja Tekesin FinNano-ohjelmien tavoitteiden kanssa. On myös tärkeää, että yliopistot, Suomen Akatemia, Tekes ja muut tutkimuksen ja teknologian rahoittajat tunnistavat myös uudet nousevat alat tai hankkeet ja luovat edellytykset niiden läpimurroille.

Työryhmä pitää välttämättömänä, että

- ohjelmarahoituksen kohdentamista ja ohjelman käynnistymistä seurataan ohjelmakauden aikana ja että saavutettuja tuloksia arvioidaan ohjelmakauden lopussa. Jatkokauden rahoituksesta seuraavalle kolmivuotiskaudelle päätetään saavutettujen tulosten perusteella. Tässä yhteydessä ohjelmarahoitusta voidaan suunnata uudelleen ja ottaa huomioon myös mahdolliset uudet avaukset, esimerkiksi "kelpoisuusehdot" täyttävät uudet osaamiskeskittymät ja keihäänkärjet.

Ohjelman tuloksia ja vaikuttavuutta voidaan arvioida pitkälle edellä mainittujen kriteerien perusteella. Seurantaa ja arviointia varten tulee asettaa asiantuntijaryhmä, jossa on riippumattomia kansainvälisistä huippuasiantuntijoita sekä osaamiskeskittymien, korkeakoulujen, opetusministeriön, Suomen Akatemian ja Tekesin edustus.

Työryhmä pitää välttämättömänä, että

- osaamiskeskittymät kehittävät keskinäistä yhteistyötä ja työnjakoa sekä yhteistyötä muiden yliopistojen, tutkimuslaitosten ja intressiryhmien kanssa. Vain siten voidaan reagoida nopeasti ja tehokkaasti muuttuviin tilanteisiin ja avautuviin uusiin mahdollisuuksiin myös kansainvälisellä tasolla.

7.2 Tietoteknisen infrastruktuurin rakentaminen ja ylläpitäminen

Tieteen tietotekniikan keskus CSC vastaa kansallisella tasolla tietoteknisen infrastruktuurin rakentamisesta ja ylläpitämisestä. Se tarjoaa suurteholaskennan osaamisen lisäksi tietoverkkojen huippuosaamista (Funet) ja runsaasti eri tiedealojen asiantuntemusta. CSC:n laskennallisen tieteen ohjelmisto- ja tietokantavalikoima on Suomen suurin. Tieteenalakohtaisen neuvonnan lisäksi CSC tarjoaa monitieteellistä osaamista esimerkiksi matemaattisessa mallintamisessa ja visualisoinnissa. CSC toimii useissa eurooppalaisissa projekteissa Suomen edustajana ja tuottaa kehitysprojektiensa kautta Suomen tutkimusyhteisölle uusia palveluita. CSC koordinoi myös lukuisia tieteenala- ja tutkimusmenetelmäpohjaisia verkostoja, jotka auttavat levittämään laskennallisen tieteen osaamista ja tietoa yhteistyömahdollisuuksista läpi tutkimusyhteisön. Laskennallisen nanotieteen keihäänkärkihankkeille CSC tarjoaa tehokkaan infrastruktuurin, jotta tutkijat pystyvät kilpailemaan alansa kansainvälisellä huipulla.

Vuosina 2007–2009 hankittavaa ja CSC:hen sijoitettavaa uutta superkonetta tulee hyödyntää paitsi kansallisten huippuhankkeiden toteuttamiseksi, myös kansainvälisen yhteistyön tiivistämiseksi ja edistämiseksi. Panostuksen avulla on mahdollista tavoitella merkittävää asemaa eurooppalaisissa laskennallisen tieteen infrastruktuureissa. Uskottavuus vaatii, että panostuksia jatketaan riittävällä tasolla myös vuodesta 2009 eteenpäin. Kilpailukykyinen huippulaskenta edellyttää vuositasolla vähintään 2–3 miljoonan euron investointeja. Muutaman vuoden välein tapahtuvan superkoneen uusimissyklin sijaan tulisi päästä jatkuvaan

päivitysmalliin, jossa kansallista infrastruktuuria voidaan kehittää laskennallisten kärkihankkeiden tahdissa.

Nanotieteen tutkimus pystyy hyödyntämään tehokkaasti myös klusterikapasiteettia. Klusterilaitteistojen hankinta, käyttöönotto, ylläpito ja uusiminen tulee tehdä tehokkaaksi tekemällä yhteistyötä tutkimusyksiköiden ja CSC:n kesken. Keskiraskaaseen kapasiteettiin on panostettava laskennallisen nanotieteen edellytysten turvaamiseksi sekä kansallisella että paikallisella tasolla. Laitteistojen ja ohjelmistojen ohella on panostettava myös ylläpitoon sekä käyttäjien tukeen ja koulutukseen. Keskiraskaan kansallisen ja paikallisen kapasiteetin tarjoaminen edellyttää vuosittain 2–2,5 miljoonan euron panostusta. Samalla on panostettava laskennallisen nanotieteen menetelmä- ja ohjelmistokehitykseen sekä koodien optimointiin ja rinnakkaistamiseen. Yhteistyöhön tulisi kannustaa esimerkiksi kehittämällä M-gridin kaltaisia toimintamalleja tietoteknisten järjestelmien hankinnassa, ylläpidossa ja tutkijapalveluissa.

Tutkimuksen tietoverkon tulee pystyä takaamaan Suomessa samat mahdollisuudet kuin on tarjolla Euroopan kansainvälisissä runkoverkoissa (Geant2 ja NORDUnet) ja useimmissa kansallisissa verkoissa. Tämä tarkoittaa Funet-verkon uudistamista 2007 sekä investointia verkkoteknologian saattamiseksi nykyaikaiselle huipputasolle käyttäen optista teknologiaa ja kuituinfrastruktuuria. Muutoin tutkijamme jäävät vaille samoja mahdollisuuksia kuin muilla Euroopan ja Pohjois-Amerikan tutkijoilla on. Tehokas tietoverkkoinfrastruktuuri mahdollistaa tutkimuksen kansainvälisen kilpailukyvyyn ja huipputason yhteistyön.

7.3 Nanoteknologia mahdollistavana teknologiana

Nanoteknologiaa pidetään mahdollistavana teknologiana, mikä tarkoittaa mm. sitä, että nanotieteeseen liittyvää osaamista ja nanoteknologiaa voidaan soveltaa, sovelletaan jo nyt ja tulevaisuudessa yhä laajemmin monilla aloilla, esimerkiksi lääketieteessä, biotekniikassa, ympäristötekniikassa, energiatekniikassa, rakennustekniikassa, avaruustutkimuksessa, terveydenhuollossa jne. Tästä seuraa välittömästi kasvava kiinnostus nanotieteen ja nanoteknologian tutkimusmenetelmiin ja -laitteisiin osaamiseen laajalla rintamalla. Kysyntä kohdistunee aluksi uusiin tutkimuslaitteisiin, huippuosaamiseen ja teknologioihin, myöhemmin koulutukseen. Tällä hetkellä tutkimuslaitteet ja niiden ylläpito on kallista, myöhemmin hinnat laskevat ja käyttö automatisoituu. Joka tapauksessa nanotieteen tutkimusmenetelmiä ja -laitteita soveltavien yliopistojen ja laitosten on mietittävä, kuinka tutkijoille voidaan taata modernit tutkimuslaitteet ja niiden käytössä tarvittava osaaminen. Voidaanko siihen kenties käyttää osaamiskeskittymien tutkimuslaitteita ja osaamista? Entä miten soveltavien alojen tutkijat hankkivat uusien tutkimusmenetelmien käytössä tarvittavan osaamisen? Uudet nanoteknologiaa soveltavat tutkimushankkeet ja -alat tuovat myös uusia mielenkiintoisia tutkimuskohteita "nanotutkimuksen" piiriin. Uusien tutkimusmenetelmien ja teknologioiden hyödyntämiseen liittyy paljon avoimia kysymyksiä, joiden oikea-aikainen ja onnistunut ratkaiseminen voi olla avain menestymiseen.

Työryhmä kannustaa nanotieteen tutkimusmenetelmien ja teknologioiden potentiaalisia käyttäjiä – korkeakouluja ja tutkimuslaitoksia – selvittämään, miten ne voivat yhteistyössä tehokkaasti hyödyntää Suomeen jo syntyneiden ja syntymässä olevien nanotieteen osaamiskeskittymien tutkimuslaitteita ja osaamista oman alansa tutkimuksessa ja tutkijankoulutuksessa. Osaamiskeskittymien ja modernein tutkimuslaitteiden varustettujen

laboratorioiden on vastaavasti tarjottava aktiivisesti tutkimus- ja tutkimuslaitepalvelujaan nanoteknologiaa tutkimuksissaan soveltaville. Lisäksi on kyettävä kehittämään nanoteknologian laitekantaa uusien kalliiden laitteiden osalta yhteistyön pohjalta.

7.4 Nanotieteen perus-, jatko- ja täydennyskoulutus

Nanotieteen uudet tutkimusmenetelmät ja teknologiat siirtyvät vähitellen tutkimuksesta ja tutkijankoulutuksesta kandidaatti- ja maisteritason koulutukseen. Opiskelijoille voidaan järjestää kursseja näiden teknologioiden ja tutkimusmenetelmien tunnetuksi tekemiseksi ja kiinnostuksen herättämiseksi kandidaatti- ja maisterivaiheen koulutuksessa. Olennaista on luoda opiskelijoille hyvä perusta monitieteiseen lähestymistapaan tutkijankoulutukseen siirtäessä. Opiskelijoita on kannustettava opiskelemaan monipuolisesti luonnontieteitä ja työskentelemään muiden alojen opiskelijoiden ja tutkijoiden kanssa. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi järjestämällä monitieteisiä nanotieteen kursseja ja maisteriohjelmiä sekä ottamalla eri alojen opiskelijoita tutkimusryhmiin tutkielmavaiheessa.

Nanoteknologian t&k- ja yritystoiminnasta kiinnostuneille opiskelijoille on järjestettävä systemaattisesti teknologia liiketoimintaan liittyvää koulutusta ja valmennusta. Tämä voidaan toteuttaa yhteisesti muiden teknologia-alojen opiskelijoiden kanssa. Opiskelijoille on pyrittävä järjestämään harjoittelupaikkoja ja mahdollisuuksia tehdä lopputyönsä teknologiayrityksissä. On kehitettävä yhteyksiä kaupallisen alan koulutukseen, tuotesuunnittelun ja käyttöliittymien koulutukseen ("human interface"), sekä ammatilliseen koulutukseen, että saadaan innovaatioprosesseihin tasapainoinen yhdistelmä tieteen ja teknologian ulkopuolista osaamista, niin että pystytään välttämään liiallinen teknologiavetoisuus.

Ammattikorkeakouluja kannustetaan järjestämään nanoteknologiaan liittyvää täsmäkoulutusta alansa teknologiayrityksille. Ammattikorkeakoulujen ja yliopistojen tulee suunnitella ja järjestää koulutusta koordinoitusti ja mahdollisuuksien mukaan yhdessä.

Nanoteknologian koulutuksen järjestäminen ammattikorkeakouluissa ja yliopistoissa ei luo merkittäviä uusia resurssitarpeita, vaan kysymys on pitkälle koulutuksen uudelleen suuntaamisesta. Uusien kurssien, opetusohjelmien ja maisteriohjelmien suunnitteluvaiheessa tarvetta lisävoimavaroihin saattaa ilmetä. Korkeakoulut voivat tehdä kehittämisohjelmaan liittyvistä koulutuksen kehittämishankkeista hanke-esityksiä opetusministeriölle tulosneuvottelujen yhteydessä käsiteltäväksi. Työryhmä pitää myös tärkeänä, että koulutus toteutetaan kansallisesti koordinoitusti välttämällä päällekkäisyyksiä ja hyödyntäen olemassa olevaa opetusta ja rakenteita. Toimivaan nanotiedeympäristöön kannattaa palkata tätä varten koordinaattori.

Nykyiset tutkijakoulut, kansainväliset kesäkoulut, pääkaupunkiseudun tutkijankoulutusyhteistyö sekä eri alojen tutkijoiden valtakunnallinen tutkimusyhteistyö tarjoavat erinomaiset edellytykset nanotieteen ja nanoteknologian poikkitieteellisen tutkijankoulutuksen kehittämiseksi ja laajentamiseksi. Nanotieteen osaamisen (tutkimustiedon ja -menetelmien) kysyntä tulee lähitulevaisuudessa kasvamaan nanotieteen tutkimuksen lisäksi monilla tutkimusaloilla sekä teknologiayrityksissä. Nanotieteitä ja -teknologiaa monipuolisesti osaavien tutkijoiden kysyntä kasvaa. Tarpeeseen voidaan vastata suuntaamalla tai laajentamalla tutkijankoulutusta monitieteisiin nanotieteen ja -teknologian tohtoriohjelmiin.

Jyväskylän kansainvälisessä kesäkoulussa on korkeatasoisia luennoitsijoita nanoteknologian huippumaista ja runsaasti opiskelijoita Itä-Euroopasta. Länsi-Euroopasta tulevien opiskelijoiden kiinnostusta ja osallistumismahdollisuuksia kesäkouluihin ja mahdollisesti vastaaviin intensiivikursseihin ja tapahtumiin talviaikana on pyrittävä aktiivisesti lisäämään. Työryhmä kehottaa yliopistoja ja tutkimuslaitoksia laajentamaan tutkijankoulutusyhteistyötä erityisesti sellaisiin eurooppalaisiin yliopistoihin ja tutkimuslaitoksiin joiden kanssa niillä on kiinteää tutkimusyhteistyötä. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi kesäkoulujen yhteydessä, käynnistämällä kansainvälisiä tutkijankoulutusohjelmia ja laajentamalla tutkijanvaihtoa rekrytoimalla aktiivisesti ulkomaisia tohtoriopiskelijoita tutkijankoulutusohjelmiin. Tutkijankoulutusyhteistyön laajentaminen edellyttää panostamisesta ohjelmien suunnitteluun, koordinointiin ja toteutukseen, mikä tulee tehdä kansallisesti koordinoitusti.

Nanotieteen ja -tekniikan osaamiskeskittymien on huolehdittava yhteistoiminnassa uuden tutkimustiedon, osaamisen ja teknologioiden välittymisestä edelleen yrityksille esimerkiksi osallistumalla yritysten henkilökunnan täydennyskoulutuksen järjestämiseen. Myös yleisen tietoisuuden lisääminen Nanotieteen ja nanotekniikan mahdollisuuksista ja rajoituksista on tärkeää.

7.5 Nanotekniikan ympäristö- ja terveysvaikutusten huomioon ottaminen

Nanotiede tarjoaa uusia mahdollisuuksia tutkimuksen ja koulutuksen sekä yritystoiminnan kehittämiseen ihmisen kokonaisvaltaisen hyvinvoinnin seurantaan ja edistämiseen, esimerkkeinä uudet diagnostiset menetelmät ja laitteet. Kemiaalliset tai biologiset nanopartikkelit ja niiden konjugoiminen biomolekyyleihin mahdollistavat uusien analyysi- ja hoitomenetelmien kehittämisen. Geeniterapia ja kohdennettu lääkehoito yleistyvät tulevaisuudessa. Uusien hoitomenetelmien yhteydessä huomiota on kiinnitettävä myös nanokomponenttien bioturvallisuuteen.

Nanotekniikka mahdollistaa ilman, veden ja maaperän tilan entistä luotettavamman monitoroinnin, mm. raskasmetalli-, molekyyli-, bakteeri- tai virusselektiivisesti, samoin uusien puhdistusmenetelmien ja päästöjä ja energiankulutusta vähentävien tuotantomenetelmien kehittämisen. Uudet menetelmät yleistyvät vääjäämättä ympäristötekniikassa.

Työryhmä pitää erittäin tärkeänä nanotieteen osaamisen ja uusien teknologioiden soveltamista ja hyödyntämistä kehitettäessä ihmisen hyvinvointiin ja terveyteen liittyviä uusia diagnostisia menetelmiä ja hoitomuotoja, samoin että Suomessa tehdään korkeatasoista nanotekniikan terveysvaikutuksiin liittyvää tutkimusta ja että muualla maailmassa tehtyä tähän alaan liittyvää tutkimustietoa välitetään tehokkaasti poliittisille päätöksentekijöille, viranomaisille ja kansalaisille.

Työryhmä pitää tärkeänä nanotieteen ja nanotekniikan avaamien uusien mahdollisuuksien hyödyntämistä ympäristötekniikassa sekä nanotekniikan ympäristövaikutusten tutkimusta ja tämän sekä muualla maailmassa tehtävän tutkimustiedon välittämistä poliittisille päätöksentekijöille, viranomaisille ja kansalaisille. Kansalaistietoisuutta tulee myös edistää tiedekasvatuksen ja tiedeviestinnän avulla.

Nanoteknologian ympäristöön, terveyteen ja yhteiskunnallisiin vaikutuksiin liittyvistä kysymyksistä on keskusteltava avoimesti ja kannustettava yliopistoja, tutkimuslaitoksia ja rahoittajia tukemaan niihin liittyvää tutkimusta. Vain näin voidaan taata, että nanoteknologiaan liittyvät mahdollisuudet ja sosiaaliset innovaatiot tulevat mahdollisimman laajasti hyödynnetyksi.

Työryhmän käsitys on, että nanoteknologia yhdistettynä ihmisen hyvinvointiin ja terveyteen liittyvien uusien diagnostisten menetelmien ja hoitomuotojen kehittämiseen samoin kuin nanoteknologiaan perustuvat uudet ympäristöteknologiat tarjoavat suomalaisille yrityksille mahdollisuuksia uusien palvelujen kehittämiseen ja vientiin. Suomi ja suomalaiset yritykset voivat osallistua EU:n komission tarkoittamaan kansainväliseen yhteistyöhön teknologistuvien valtioiden ja lähialueiden kanssa nanoteknologian sovelluksia ja palveluja kehittämällä ja markkinoimalla. Työryhmä kannustaa kaikkia intressiryhmiä ja rahoittajia aloitteellisuuteen avautuvien uusien mahdollisuuksien hyödyntämiseksi.

7.6 Nanoteknologian sosiaalisten ja yhteiskunnallisten vaikutusten huomioon ottaminen

Työryhmä pitää tärkeänä nanoteknologiaan liittyvien sosiaalisten ja yhteiskunnallisten ulottuvuuksien ja vaikutusten – esimerkiksi turvallisuusriskit, valvonta ja turvallisuus, etiikka, globalisaatio, uudet tuotantoteknologiat ja -menetelmät, lopputuotteiden hyväksyttävyyys sekä sosiaalisten suhteiden ja arvojen muuttuminen – tiedostamista ja tutkimista.

Yritysten ja sijoittajien kannalta uusiin teknologioihin liittyy aina vaikeasti ennustettavia ihmisten ja markkinoiden käyttäytymisestä johtuvia riskitekijöitä. Uusiin teknologioihin liittyvät sosiaaliset ja kulttuuriset tekijät vaikuttavat ratkaisevasti siihen, mitkä tuotteet ja missä muodossa päätyvät markkinoille. Lopputuotteiden hyväksyttävyyys ja kysyntä on otettava huomioon mahdollisuuksien mukaan jo uusien tuotteiden ja tuotantoprosessien suunnittelu- ja syntyvaiheessa. On myös kaikin tavoin varottava epärealististen odotusten muodostumista esimerkiksi liitetoiminta- ja sijoitusmarkkinoilla.

Nanoteknologian riskien hallitsemiseksi ja kansalaisten luottamuksen saavuttamiseksi on panostettava ympäristö-, terveys- ja turvallisuusriskien tutkimukseen, teknologian ja sovellusten valvontaan ja testien kehittämiseen, kansainvälisten standardien ja normien säätämiseen sekä avoimeen vuoropuheluun kansalaisten kanssa. Uhkien torjuminen edellyttää myös kansainvälisten sopimusten tekemistä ja kansainvälistä yhteistyötä.

Uudet teknologia- ja tuotantoprosessit edellyttävät yrityksiltä, yliopistoilta, tutkimuslaitoksilta ja kansalaisilta uusia toimintatapoja, poikkitieteellistä ja -teknologista yhteistyötä ja vuoropuhelua. Yhteiskunnan, yritysten ja organisaatioiden uudistumiskyky – sosiaaliset innovaatiot – vaikuttavat ratkaisevasti niiden elinvoimaisuuteen. Nanoteknologia nostaa luonnontieteiden ja insinööritieteiden ja lääketieteen tutkimustiedon ja -menetelmien integroimisen lisäksi esiin yhteiskunta- ja taloustieteiden osaamisen merkityksen pyrittäessä luomaan markkinoille uusia hyväksyttäviä tuotteita ja palveluja. Kansalaistietoisuutta tulee vahvistaa ottamalla koulutuksen kaikilla tasoilla huomioon nanotieteen kehityksen ja tulevaisuuden näkymät.

Eri intressiryhmien ponnisteluja ulkomaisen riskirahoituksen houkuttelemiseksi Suomeen, immateriaalioikeusosaamisen kehittämiseksi sekä keksintöjen ja oikeuksien hyödyntämiseksi

ja sitä kautta uusien teknologiayritysten luomiseksi maahamme, on lisättävä. Uusimalla vakiintuneiden toimijoiden prosesseja ja tuotteita nanoteknologialla voi olla merkittävä uutta kysyntää luova ja työpaikkoja säilyttävä vaikutus.

7.7 Teknologialiiketoiminnan kehittäminen

Hyvin varustettujen nanoteknologian osaamiskeskittymien luominen yhdessä Suomen Akatemian FinNano-tutkimusohjelman ja Tekesin FinNano-teknologiaohjelman kanssa luovat hyvän maaperän nanoteknologiaan ja sen sovelluksiin perustuvan liiketoiminnan kehittämiseksi. Se ei kuitenkaan riitä tekemään innovaatioketjusta aukotonta ja toimivaa. Tutkimuslaitoksissa ja yrityksissä syntyvien innovaatioiden tuotteistaminen ja uusien palvelujen kehittäminen edellyttävät monenlaisen osaamisen yhdistämistä ja monien osapuolien yhteistyötä. Työryhmä suosittelee, että osaamiskeskittymät palkkaavat teknologiakoordinaattorin tai vastaavan huolehtimaan yrityksille suunnattavien t&k- ja liiketoimintapalvelujen kehittämisestä.

Nanotieteen tutkimustulosten ja nanoteknologioiden hyötykäytön tehostamiseksi korkeakoulujen, tutkimuslaitosten, yrittäjien ja välittäjäorganisaatioiden (TE-keskukset, teknologiapuistot, yrityshautomot) yhteistyötä ja verkottumista on tuettava kaikin käytettävissä olevin keinoin. Näin mahdollistetaan nanoteknologiainnovaatioiden ja osaamisen tehokas siirtyminen lähialojen potentiaalisten soveltajien ja teknologiayritysten käytettäväksi.

Nanoteknologian liiketoimintaosaamisen kehittämiseksi (nano)teknologialiiketoiminnan tutkimukseen tulisi panostaa pitkäjänteisesti, samoin teknologialiiketoimintaan liittyvän koulutuksen kehittämiseen.

Teknologiajohtamiseen, -liiketoimintaan ja -yrittäjyyteen liittyvää tukea alkavien yritysten liiketoiminnan käynnistämiseen ja kehittämiseen on lisättävä tutkimusalasta riippumatta. Yrittäjyyden uramahdollisuuden liittäminen opinto-ohjelmiin esimerkiksi jatko-opintotasolla olisi suotavaa.

Tutkimusryhmille ja alkaville yrityksille on luotava edellytykset kehittää ja testata uusien teknologioiden pilotti- ja pienimuotoista sarjatuotantoa koelaboratorioissa. Tutkimustulosten liiketoiminnallisen potentiaalin varmentaminen pitää hoitaa ainakin osittain julkisin varoin. Tämä on oleellista: osa suurvaltojen nanoteknologiakehityksestä tapahtuu kansallisen turvallisuuden sateenvarjon alla ja osittain sotilassovelluksiin nojautuen, jotka sallivat oleellisen valtion subvention tuotekaaren kriittisessä alkuvaiheessa ennen kuin tuotteet tulevat kuluttajamarkkinoille.

Tutkimus- ja tuotekehityspainotteisille alkaville yrityksille on mahdollistettava käynnistysrahoitus riskirahoituksena tai julkisena yritystukena.

7.8 Osallistuminen EU:n nanoteknologian infrastruktuurin rakentamiseen

Suomalaisen nanotieteen tutkimuksen kilpailukyvyyn kannalta on tärkeää integroida paikallisen ja kansallisen tason infrastruktuurit kansainvälisiin infrastruktuureihin. Olennainen uusia tutkimusinfrastruktuureja koskeva suunnitelma on ESFRI:n "List of Opportunities", Tietoteknisiä kehitysnäkymiä on hahmoteltu e-IRG:n suunnitelmissa.⁴³ EU ei tule tekemään infrastruktuureilla aluepolitiikkaa, vaan kansalliset resursoinnit on hoidettava itse.

Kansallisella yhteistyöllä ja kansainvälisesti vartenotettavilla kansallisilla infrastruktuureilla on mahdollista päästä merkittäviin kumppanuuksiin EU-tutkimusohjelmissa ja -infrastruktuureissa.

Kansallisen tason infrastruktuurit Suomessa vastaavat kooltaan Euroopan isojen maiden paikallisia infrastruktuureja, joten vaikuttavuus edellyttää liittoutumista esimerkiksi pohjoismaisella tasolla. Tällaisia liittoutumia on valmisteilla, uusimpana Nordic Photonics Forum kaikkien Pohjoismaiden kesken (2006 alkaen). Koska tutkimusjärjestelmä on niin hajautunut ja sirpaloitunutta, Suomessa on vain muutamia kansallisen tason infrastruktuureja, joilla on riittävä kriittinen massa.

Koska kansainvälisen tason infrastruktuurihankkeissa edellytetään osapuolilta myös omaa panostusta, tulee rahoitusjärjestelyiden mahdollistaa kärkihankkeiden riittävä tukeminen kansallisella rahoituksella. Keihäänkärkihankkeiden on luotava ennakkoluulottomasti yhteistyötä yli tieteenalojen, yhdessä eri yliopistojen ja tutkimuslaitosten kanssa.

7.9 EU:n tutkimuksen seitsemännen puiteohjelman ja nanoteknologian toimintaohjelman hyödyntäminen

Nanotieteen osaamiskeskittymillä on hyvät edellytykset osallistua keihäänkärkialoilla EU:n tutkimuksen 7. puiteohjelman teknologiavetoisen 'yhteistyö'-ohjelman ja erityisesti sen 'nanotieteet, nanoteknologia, materiaalit ja uudet tuotantoteknologiat' -ohjelman hakuihin ja hankkeisiin. Niihin tulee vetää kansallisella tasolla partnereiksi sekä muita tutkimuslaitoksia ja tutkimusryhmiä että suomalaisia teknologiayrityksiä. Sama koskee pitkälle puiteohjelman muihin ohjelmiin osallistumista. Menestyminen ohjelmahauissa ja hankkeiden toteuttaminen edellyttävät panostamista hankkeiden valmisteluun, koordinointiin sekä aktiivista ja pitkäjänteistä t&k-yhteistyötä alan muiden eurooppalaisten tutkimus- ja teknologiakeskusten kanssa.

Työryhmä suosittaa, että osaamiskeskittymät ryhtyvät hyvissä ajoin valmistelevaan hankkeita valitsemiensa koti- ja kansainvälisten yliopistojen tai -keskusten ja yritysten kanssa ja palkkaavat tarpeen mukaan koordinaattoreita hoitamaan käytännön valmisteluja. Hankkeiden valmistelu ja toteutus tulee hoitaa kansallisella tasolla koordinoitusti kansallisen potentiaalin hyödyntämiseksi mahdollisimman tehokkaasti.

Työryhmä kannustaa tutkimuslaitoksia, tutkimusryhmiä ja yksittäisiä tutkijoita valmistautumaan EU:n tutkimuksen 7. puiteohjelman hakuihin ja hakemaan niistä aktiivisesti rahoitusta.

⁴³ e-Infrastructures Opportunities List, <http://www.e-irg.org/meetings/2005-roadmap/OpportunitiesList.pdf>.

7.10 Nanoteknologiaohjelman seuranta ohjelmakauden aikana

Työryhmä esittää, että osaamiskeskittymät ryhtyvät heti ohjelmakauden alussa seuraamaan ja ohjaamaan ohjelman toteutumista yhteistyössä yliopistojen, opetusministeriön, Suomen Akatemian ja Tekesin kanssa kiinnittäen huomiota erityisesti

- tieteellisen ja teknologisen työn tasoon
- keskinäiseen yhteistyöhön ja työnjakoon sekä yhteistyöhön muiden yliopistojen, tutkimuslaitosten ja intressiryhmien kanssa
- nanotieteen ja nanoteknologian koulutuksen ja tohtoriohjelmien kehittämiseen
- infrastruktuurin ja tutkimuslaitehankintojen koordinoimiseen ja ylläpitämiseen
- tietoteknisen infrastruktuurin ja palvelujen kehittämiseen ja ylläpitämiseen
- laajojen EU-hankkeiden valmisteluun ja osallistumisen koordinoimiseen
- yrityksille suunnattavien palvelujen ja yritysyhteistyön kehittämiseen
- nanotieteitä ja -teknologiaa koskevan uuden tutkimustiedon viemiseen sidos- ja intressiryhmille

8 Opetusministeriön nanotieteen ja -teknologian kehittämishjelma vuosina 2007–2009

Työryhmä esittää, että opetusministeriö toteuttaa yliopistoissa vuosina 2007–2009 nanotieteen kehittämisohjelman, johon kohdennetaan rahoitusta yhteensä 24 miljoonaa euroa. Korkeatasoinen nanotieteen koulutus ja tutkimus edellyttävät tiivistä kansallista ja kansainvälistä yhteistyötä, jonka merkitys korostuu keihäänkärkialoilla.

Kehittämisohjelman tulee tukea nanotieteen tutkimusedellytysten kehittämistä ja huolehtia siitä, että alan koulutustarjonta vastaa työelämän tarpeita (tutkimus ja yritykset). Huomiota tulee kiinnittää riittävän maisteri- ja tutkijankoulutuksen kehittämiseen sekä alan tarpeita tukevaan täydennyskoulutukseen.

Työryhmä pitää tärkeänä, että koulutusta kehitetään kansallisesti koordinoitusti välttäen päällekkäisyyksiä ja hyödyntäen olemassa olevaa opetusta. Yliopistojen on sovittava keskinäisestä yhteistyöstä ja työnjaosta sekä määriteltävä omat vahvuusalueensa. Yliopistojen ja tutkimuslaitosten yhteistyötä tulee vahvistaa.

Kehittämisohjelmassa yliopistojen tutkimusedellytyksiä tulee vahvistaa erityisesti ns. keihäänkärkialoilla. Työryhmä katsoo, että tällaisia Suomessa ovat nanomateriaalit, nanoelektroniikka ja -fotoniikka sekä nanobioteknologia. Samoin tulee vahvistaa olemassa olevia vahvoja tutkimus- ja osaamiskeskittymiä. Työryhmä katsoo, että erityisesti nanotieteen kalliiden tutkimusinfrastruktuurien hankinnassa, ylläpitämisessä sekä tukipalveluissa tulee hyödyntää yhteistyön tarjoamia mahdollisuuksia.

Korkeatasoisen tutkimuksen rinnalla kehittämisohjelman tulee vahvistaa osaamisen siirtoa, yritys yhteistyötä ja tutkimustulosten liiketoiminnallista hyödyntämistä. Panostuksilla tulee tukea mm. Tekesin FinNano-teknologiaohjelman ja Suomen Akatemian FinNano-tutkimusohjelman tavoitteita. Ammattikorkeakouluja kannustetaan järjestämään nanotieteen liittyvää täsmäkoulutusta.

Työryhmä esittää, että opetusministeriö nimeää nanotieteen kansallisen yhteistyön vahvistamiseksi alan yhteistyöfoorumin kehittämään toimijoiden välistä työnjakoa ja seuraa maan ohjelman toteutumista. Yhteistyöfoorumin tehtävänä on ohjelman arvioinnin suunnittelu ja ohjelman seurannassa tarvittavien indikaattorien kehittäminen.

Työryhmä pitää tärkeänä, että Tieteen tietotekniikan keskuksen CSC:n toimintaedellytykset turvataan ja supertietokone uusitaan suunnitellussa aikataulussa. Tavoitteena on, että Suomella on merkittävä asema laskennallisen tieteen eurooppalaisissa infrastruktuureissa.

Kehittämisohjelman rahoituskriteerit ja keihäänkärkialojen määritelmät esitetään sivuilla 71–72 ja liitteessä 1.

Kehittämishojelman rahoituskriteerit

- 1) **Osaamiskeskittymän edellytykset kansainvälisesti merkittävään nanotieteen tutkimukseen ja läpimurtoon keihäänkärkialoilla** (arviointi: julkaisut ja kutsutut esitelmät korkeatasoisilla foorumeilla, sitaatioiden määrä, tieteelliset tunnustukset ja palkinnot esim. viiden viimeisen vuoden aikana);
- 2) **Osaamiskeskittymän edellytykset hankkia Suomen Akatemian, Tekesin, EU:n ja muuta tutkimusrahoitusta** (arviointi: keskittymän SA-, Tekes-, EU- ja muu nanotieteen tutkimusrahoitus esim. viiden viimeisen vuoden aikana);
- 3) **Osaamiskeskittymän edellytykset luoda osaamiskeskusten, yritysten, ja tutkimustulosten muiden hyödyntäjien verkostoja sekä koordinoita EU- ja muita tutkimus- ja teknologiahankkeita** (arviointi: keskittymän kansainvälinen asema ja yhteydet, EU- ja muiden hankkeiden koordinointi ja osallistuminen);
- 4) **Korkeatasoinen infrastruktuuri ja sen ylläpitäminen** (arviointi: olemassa oleva infrastruktuuri; emoyliopiston/-yliopistojen, tutkimuslaitosten tuki ja sitoutuminen; ESFRI, EU:n nanoteknologian toimintaohjelma, rakennerahastot ja investointipankki, kunnat, muut mahdolliset rahoittajat);
- 5) **Osaamiskeskittymän edellytykset tukea ja kehittää teknologia liiketoimintaa** (arviointi: nykyinen teknologia liiketoiminta ja teknologiansiirto; patentit ja muu tulosten suojaaminen; teknologiakeskukset ja tiedepuistot; teknologia liiketoimintaan liittyvä koulutus);
- 6) **Osaamiskeskittymän edellytykset uudistaa olemassa olevaa ja luoda uutta yritystoimintaa** (arviointi: nykyinen yritys yhteistyö, perustettavat teknologia yritykset ja niiden houkuttelemat kolmannet osapuolet, kuten rahoittajat ja muut yritykset, teollisuuden avainalueet; alan odotusarvo yritystoiminnan kannalta);
- 7) **Nanotieteen koulutus** (arviointi: monitieteisen nanotieteen ja nanoteknologian koulutuksen järjestäminen, nanotieteen ja nanoteknologian maisteriohjelmat, nanotieteen tutkijakoulut, kansainvälinen tutkijankoulutus ja tutkijankoulutus yhteistyö);
- 8) **Miten osaamiskeskittymät täydentävät ja tukevat muita osaamiskeskittymiä ja -verkostoja** (arviointi: keskittymien välinen työnjako, mahdollisuudet muiden alojen – mm. biotekniikka, lääketiede, informaatioteknologia, hyvinvointitekniikka – tutkijoille hyödyntää tutkimuslaitteita ja osaamista, valmiudet tutkimus-, koulutus- ja teknologia yhteistyöhön muiden alojen kanssa).

Keihäänkärkialojen määritelmät

Nanomateriaalit yhdistävät useita tieteenaloja, joissa käytetään nanokokoluokan erityisiä ominaisuuksia periaatteellisesti uudenlaisten toimintojen ja ominaisuuksien aikaansaamiseksi.

Nanoelektroniikka yhdistää elektronisten rakenteiden erityiset nanokokoluokan ominaisuudet komponentteihin periaatteellisesti uudenlaisten toimintojen aikaansaamiseksi.

Nanofotoniikka on se osa fotonikasta, jossa käytetään hyväksi nanokokoluokan erityisiä ominaisuuksia periaatteellisesti uudenlaisten toimintojen aikaansaamiseksi.

Nanobioteknologia yhdistää biotieteet muihin tieteenaloihin hyödyntäen nanokokoluokan biomolekyylien ja virusten erityisiä ominaisuuksia uudenlaisten toimintojen ja rakenteiden aikaansaamiseksi.

Usein toistuvat lyhenteet

Yliopistot ja tutkimuslaitokset

HY	Helsingin yliopisto
JoY	Joensuun yliopisto
JY	Jyväskylän yliopisto
OY	Oulun yliopisto
TaY	Tampereen yliopisto
TKK	Teknillinen korkeakoulu
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
TY	Turun yliopisto
ÅA	Åbo Akademi
CSC	Tieteen tietotekniikan keskus
LCC	Laser Competence Centre Finland
NSC	Jyväskylän nanotiedeokeskus
ORC	Optoelektroniikan tutkimuskeskus
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

Muut

AFM	Atomic Force Microscope
ALD	Atomic Layer Deposition
MBE	Molecular Beam Epitaxy
SEM	Scanning Electron Microscope
SPM	Scanning Probe Microscope
TEM	Tunneling Electron Microscope



OPETUSMINISTERIÖ

Undervisningsministeriet

MINISTRY OF EDUCATION

Ministère de l'Éducation

ISBN 952-485-048-6

ISBN 952-485-049-4 (PDF)

ISSN 1458-8102

Julkaisumyynti / Bokförsäljning

Yliopistopaino / Universitetstryckeriet

PL 4 / PB 4 (Vuorikatu 3 / Berggatan 3)

00014 Helsingin Yliopisto / Helsingfors Universitet

puhelin / telefon (09) 7010 2363

faksi / fax (09) 7010 2374

books@yopaino.helsinki.fi

www.yliopistopaino.helsinki.fi